МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИТУАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Сборник докладов

9–13 апреля 2018 г.

ГУАП
Санкт-Петербург
2018

УДК 001(042.3)
ББК 72я43
М74

М74 Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: сб. докл. науч. сессии ГУАП (Санкт-Петербург, 9–13 апр. 2018 г.). – СПб.: ГУАП, 2018. – 277 с.: ил.
ISBN 978-5-8088-1316-8

Доклады отражают весь спектр направлений научных работ, проводимых Институтом фундаментальной подготовки и технологических инноваций ГУАП.

Оргкомитет конференции

Председатель оргкомитета:

В. В. Окрепилов – академик РАН, доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности

Члены оргкомитета:

Ю. А. Антохина – доктор экономических наук, профессор, ректор ГУАП

А. А. Оводенко – доктор технических наук, профессор, президент ГУАП

Е. Г. Семенова – доктор технических наук, профессор, директор Института фундаментальной подготовки и технологических инноваций

А. О. Смирнов – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой высшей математики и механики

В. Г. Фарафонов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики

И. И. Коваленко – кандидат физико-математических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой физики

УДК 001(042.3)
ББК 72я43

ISBN 978-5-8088-1316-8

© Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2018

Традиционная научная сессия ГУАП посвящена Дню космонавтики – событию, навсегда вошедшему в историю человечества. В мире этот день отмечается как Всемирный день авиации и космонавтики. Международное празднование годовщины первого полета человека в космос – это признание вклада советской научной и технической мысли в осуществление самых смелых проектов, которые когда-либо задумывало человечество.

Прорыв в отрасли дал мощный импульс развитию отечественной индустрии, науки и образования. Многие из тех, кто обеспечивал этот прорыв, были выпускниками Ленинградского университета аэрокосмического приборостроения – одного из ведущих отечественных образовательных центров. Сегодня сохраняется преемственность развития вуза как центра научно-технической мысли, получившего международное признание, и образовательного учреждения, готовящего специалистов для работы в самых передовых отраслях современной индустрии.

Ежегодные научные сессии, проводимые в Университете, позволяют обсудить самые актуальные исследовательские проблемы, последние разработки отечественных и зарубежных ученых. Сборники, выпускаемые по итогам сессии, дают возможность обмениваться идеями и результатами исследований научным сотрудникам, преподавателям и студентам, продолжая развитие аэрокосмической отрасли.

Выдающиеся достижения в развитии техники и технологий не могли быть обеспечены без внимания к проблемам качества. В настоящее время управление качеством расширяет горизонты и от качества продуктов и процессов переходит к осмыслению и управлению качеством жизни. Обеспечение безопасной, благополучной и осмысленной жизни для большинства граждан сегодня кажется не менее сложной и амбициозной задачей, чем полет в космос в середине прошлого века. Но наш народ сумел доказать, что ему по плечу решение самых трудных задач.

В нашем обществе сложилось понимание того, что решение такой сложной проблемы возможно только путем интеграции науки и образования, активизации инновационной деятельности, усилению ее воздействия на развитие экономики и социальной сферы. «Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем» – конференция, которая традиционно проводится в рамках научной сессии, несомненно, внесет свой вклад в разработку проблем и решение самого широкого спектра задач, связанных с качеством жизни.

Уверен, что научная сессия Университета будет способствовать как увеличению вклада высшей школы, всей системы образования в решение технических задач развития аэрокосмической отрасли, так и повышению качества жизни в целом. Желаю всем участникам научной сессии успешной и плодотворной работы!

Доктор экономических наук,
профессор, академик РАН,
заслуженный деятель науки и техники РФ
Владимир Валентинович Окрепилов

УДК 621.3.019.34

М. А. Артюхова
Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ РЕЗЕРВИРОВАННОГО РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В статье предложена математическая модель оценки показателей надежности невосстанавливаемого резервированного бортового радиоэлектронного оборудования, эксплуатируемого при воздействии ионизирующих излучений естественного происхождения.
***Ключевые слова**: безотказность, накопленная доза.*

M. A. Artyukhova
Joint-stock company "Research and Production Enterprise "Radar mms"

INFLUENCE OF IONIZING RADIATION ON INDICATORS OF RELIABLE ELECTRONIC EQUIPMENT RELIABILITY

The article considers the mathematical model of an estimation of indicators of reliability of the non-renewable equipment, operated under influence of ionizing radiations of a natural origin.
***Keywords:** reliability, total ionizing dose.*

Расчет показателей надежности радиоэлектронного оборудования (РЭО) является наиболее распространенной и важной задачей теории надежности. Математическая модель отказов РЭО однозначно определяется типом математической модели отказов его элементов. Вид функции распределения наработки до отказа определяется видом конкретных реализаций изменения определяющего параметра и превышения им предельного уровня, что приводит к отказу компонента и, соответственно, оборудования и системы в целом.

В качестве единицы дозы излучений принято использовать 1 грей (100 рад), представляющий собой дозу излучения, при которой веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующих излучений (ИИ) 1 Дж. В общем случае связь между единицами поглощенной и экспозиционной доз зависит от энергии и облучаемого материала. Для воздуха при электронном равновесии 1 рад $= 3 \cdot 10^7$ электрон/см^2 $= 10^6$ протон/см^2 $= 3 \cdot 10^6$ нейтрон/см^2 (при энергии частиц 1 МэВ).

Например, на крейсерских высотах полета – выше 9000 м – нейтроны являются главной причиной одиночных сбоев в бортовом РЭО самолетов.

Воздействие ИИ может в том числе приводить к параметрическим отказам полупроводниковых приборов и интегральных микросхем [1]. Критерием радиационной стойкости оборудования по эффектам накопленной дозы принято считать уровень стойкости наиболее «слабого» элемента из его состава.

Основываясь на положениях [2], выведем математическую модель для учета влияния ИИ при анализе показателей надежности простейших вариантов систем: последовательное соединение элементов, нагруженное резервирование, ненагруженное резервирование.

Рассмотрим систему из соединенных последовательно элементов. Положим, что процессы деградации элементов системы независимы и имеют место нормированные предельные значения. В таком случае вероятность безотказной работы (ВБР) последовательной системы из n элементов описывается следующим выражением [3, 4]:

$$R(t) = \prod_{i=1}^{n} R_i(t). \quad (1)$$

При последовательном соединении элементов выход из строя любого из элементов приводит к отказу системы.

Формула (1) справедлива и для системы при воздействии накопленной дозы. Исходя из этого, выражение ВБР для системы из n последовательных элементов может быть записано как

$$R(t)=\prod_{i=1}^{n}R_{\lambda i}(t)\times\prod_{j=1}^{k}R_{Dj}(t)\times[1-Q_{v\,\text{сист}}(t)],$$

где $R_{\lambda i}(t)$ – ВБР i-го элемента системы без учета ИИ; n – общее число элементов в системе; $R_{Dj}(t)$ – ВБР j-го критичного элемента (коэффициент запаса по стойкости к накопленной дозе $К_З < 3$) при воздействии ИИ в части дозовых эффектов; k – общее число критичных элементов в системе; $Q_{v\text{сист}}(t)$ – вероятность возникновения отказа системы из-за воздействия заряженных частиц.

В невосстанавливаемом бортовом РЭО ответственного назначения широко применяется резервирование – способ обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств и возможностей, избыточных по отношению к минимально необходимым для выполнения требуемых функций.

Наиболее часто в невосстанавливаемом оборудовании применяется структурное резервирование – способ повышения надежности объекта, состоящий в применении в системе дополнительных элементов, которые используются системой после отказа основных элементов. Введение резерва элементов увеличивает суммарную интенсивность отказов (ИО) элементов, при этом ощутимо уменьшает ИО самой системы.

Отказ системы со структурным резервированием наступает только тогда, когда нарушение работоспособности основного элемента (или основных элементов) не удается компенсировать своевременным подключением резервного элемента.

При наличии потока отказов элементов структурное резервирование позволяет обеспечить непрерывную работу системы в течение промежутка времени, превосходящего среднюю наработку до отказа нерезервированной системы. Рассмотрим на простейших примерах структурного резервирования, верно ли данное утверждение для потока отказов, индуцированного воздействием ИИ.

Для этого используем модель отказа компонента при воздействии ИИ из [2]. Результаты испытаний компонентов на стойкость к эффектам накопленной дозы показывают, что распределение уровней предельной накопленной дозы d можно аппроксимировать нормальным законом с параметрами математического ожидания $m(d)$, среднеквадратичного отклонения $\sigma(d)$ и плотностью:

$$f(t)=\frac{1}{\sqrt{2\cdot\pi}}\cdot e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{d-m(d)}{\sigma(d)}\right]^2}. \qquad (2)$$

Рассмотрим нагруженное резервирование с цельной кратностью (рис. 1, *а*). Имеются функции распределения отказов элементов $F_1(t)$, $F_2(t),...,F_n(t)$. Так как система состоит из однотипных элементов с одинаковыми параметрами средней скорости процесса $m(V)$, коэффициента вариации $\nu(V)$ и определяющим параметром П, то функции распределения отказов $F_1(t)=F_2(t)=...=F_n(t)=F(t)$. Воздействие ИИ распространяется одновременно на все элементы системы, что позволяет применить суперпозицию распределений. Тогда функция распределения отказов системы будет определяться как:

$$Q(t)=p_1\cdot F_1(t)+p_2\cdot F_2(t)+\ldots+p_n\cdot F_n(t), \qquad (3)$$

где p_i – весовые коэффициенты, $p_1+p_2+...+p_n=1$.

Так как функции распределения отказов элементов равны, то функция распределения отказов системы будет иметь вид

$$Q(t)=F(t). \qquad (4)$$

Выражение ВБР для системы из n параллельных нагруженных элементов может быть записано как

$$R(t)=\left(1-\prod_{i=1}^{n}\left[1-R_{\lambda_i}(t)\right]\right)\cdot R_D(t). \qquad (5)$$

Рассмотрим систему с общим ненагруженным резервированием (рис. 1, *б*). Процесс деградации элементов системы начинается с момента начала эксплуатации системы вне зависимости от режима работы элементов. Исходя из физики процесса деградации элементов при воздействии радиации, имеем два случая:

1. $F_1(t)=F_2(t)=...=F_n(t)=F(t)$ – скорость деградации элемента под облучением не зависит от режима работы. Тогда функция распределе-

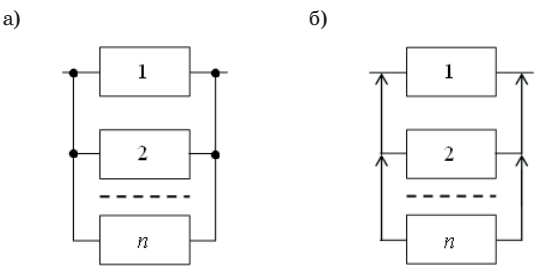


Рис. 1. Схемы структурного резервирования: а – нагруженное резервирование; б – ненагруженное резервирование

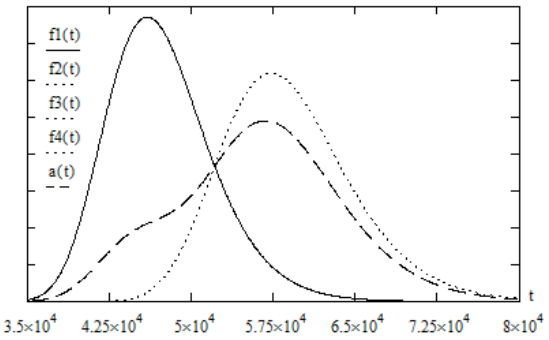


Рис. 2. Плотность распределения отказов a(t) системы с общим ненагруженным резервированием: f1(t) – плотность распределения отказов для основного элемента; f2(t) = f3(t) = f4(t) – плотность распределения отказов для ненагруженных резервных элементов

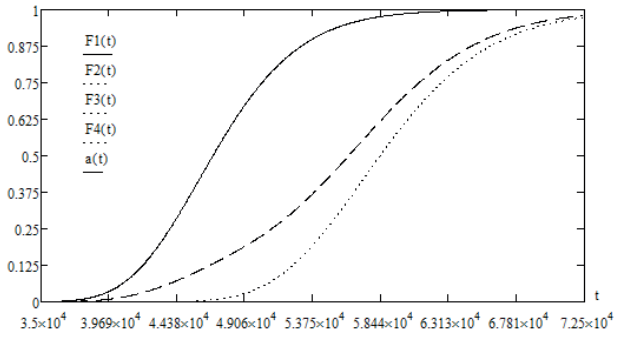


Рис. 3. Зависимость функции распределения a(t) от времени для системы с общим ненагруженным резервом. F1(t) – функция распределения отказов основного элемента; F2(t)=F3(t)=F4(t) – функция распределения отказов резервных элементов

ния отказов определяется выражением (4), как и в случае системы с общим нагруженным резервированием.

2. $F_1(t) \neq F_2(t) = ... = F_n(t) = F(t)$ – деградационные процессы протекают медленнее в обесточенных элементах. Функция распределения отказов такой системы также определяется через суперпозицию распределений (3).

Рассмотрим подробнее второй случай.

На рис. 2 приведен пример суперпозиции плотности распределений отказов для системы с общим ненагруженным резервированием с кратностью $n = 3$. Подобная картина имеет место, когда показатели стойкости по дозовым эффектам элемента ощутимо различаются в зависимости от режима работы.

Типовая зависимость функции отказов от времени приведена на рис. 3. В начальный момент времени частота отказов равна нулю.

Основное свойство резервирования заключается в том, что чем надежнее исходная система, тем выше его эффективность.

Типовая зависимость ИО системы от времени (рис. 4) имеет характерные особенности. В начальный момент времени ИО равно нулю, что объясняется однородностью потока отказов. С увеличением времени ИО монотонно возрастает, асимптотически приближаясь к значению ИО нерезервированной системы.

Для случая, когда скорость деградации элемента не зависит от режима работы, выражение ВБР для системы из n параллельных ненагруженных элементов может быть записано как

$$R(t) = \left(R_{n-1}(t) + \int_0^t R_n(t-\tau) \cdot f_{n-1}(\tau) d\tau \right) \cdot R_D(t). \quad (5)$$

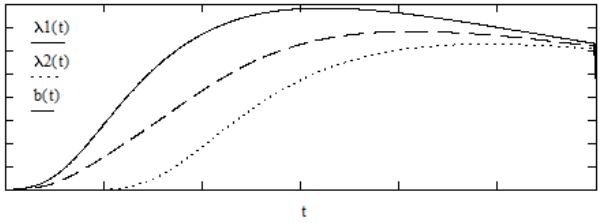


Рис. 4. Типовая зависимость ИО системы с общим ненагруженным резервированием

Для второго случая можно записать:

$$R(t) = R_{n-1}(t) R_{D1}(t) + \int_0^t R_n(t-\tau) \cdot R_{D2}(t-\tau) \cdot f_{n-1}(\tau) \cdot f_{D1}(\tau) d\tau, \quad (6)$$

где $n - 1$ означает, что соответствующая характеристика относится к резервированному элементу, при отказе которого включается в работу последний, n-й резервный элемент; $R_{D1}(t)$ – ВБР при воздействии ИИ работающего элемента; $R_{D2}(t)$ – ВБР при воздействии ИИ резервного элемента; τ – момент отказа работающего элемента, $\tau < t$.

В отличие от ВБР системы, которая может возрастать при резервировании в десятки раз даже при небольшой кратности резервирования, средняя наработка системы возрастает очень медленно. В случае воздействия ИИ в части эффектов накопленной дозы резервирование и вовсе может оказаться неэффективным, если скорость изменения и граничный уровень определяющего параметра компонента не зависят от режима работы.

Таким образом, на основании представленных моделей, учитывающих эффекты накопленной дозы при анализе надежности, можно сделать вывод, что в общем случае резервирование бортового радиоэлектронного оборудования позволяет лишь незначительно улучшить показатели безотказности.

Библиографический список

1. *Таперо, К. И.* Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения / К. И. Таперо, В. Н. Улимов, А. М. Членов. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2012. 304 с.
2. *Артюхова, М. А.* Прогнозирование показателей надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов при воздействии ионизирующих излучений низкой интенсивности / М. А. Артюхова, В. В. Жаднов // Надежность. 2015. № 1. С. 13–18.
3. *Черкесов, Г. Н.* Надежность аппаратно-программных комплексов: учеб. пособие / Г. Н. Черкесов. СПб.: Питер, 2005. 479 с.
4. *Дружинин, Г. В.* Надежность автоматизированных производственных систем. 4-е изд., перераб. и доп. / Г. В. Дружинин. М.: Энергоатомиздат, 1986. 480 с.

УДК 621.396.96

А. А. Блудов*
доктор технических наук, профессор, главный конструктор
В. С. Павлов*
доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник
Е. В. Балашов*
аспирант, заместитель главного конструктора
**Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»*

МОДЕЛЬ ПЕЛЕНГАЦИИ ОБЪЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАВНОСИГНАЛЬНОГО МЕТОДА В УСЛОВИЯХ УГЛОВЫХ ЭВОЛЮЦИЙ НОСИТЕЛЯ РЛС

В статье описывается специфика применения равносигнального метода пеленгации в условиях угловых эволюций носителя радиолокационных станций (РЛС).

***Ключевые слова**: модель, равносигнальный метод пеленгации, угловые эволюции, РЛС.*

A. A. Bludov*
PhD. Tech., Proffesor, Chief Designer
V. S. Pavlov*
PhD. Tech., Proffesor, Leading Researcher
E. V. Balashov*
PhD. Student, Deputy Chief Designer
**Joint-stock company "Research and Production Enterprise "Radar mms"*

OBJECT PELENGATION MODEL USING RAVESIGNAL METHOD IN THE ANGULAR EVOLUTION OF RADAR CARRIER

The article presents the specific of using ravesignal method in the angular evolution of radar carrier.

***Keywords:** model, ravesignal pelengation method, angular evolution, radar.*

Рассматривается специфическая радиолокационная система, в которой сканирование пространства производится за счет вращения носителя РЛС вокруг продольной оси. В такой системе реализация равносигнального метода пеленгации осуществляется за счет использования специфической диаграммы направленности антенны: широкой со смещенным максимумом в *E*-плоскости и узкой симметричной в *H*-плоскости. В качестве аналитического описания диаграммы используется модель диаграммы Гаусса [1]:

$$G(\alpha,\beta) = e^{-0.69\left(\frac{\alpha}{\alpha_{0,5}}\right)^2} e^{-0.69\left(\frac{\beta-\beta_0}{\beta_{0,5}}\right)^2}, \qquad (1)$$

где α – угол места; β – угол азимута; $\alpha_{0,5}$ – ширина диаграммы в *H*-плоскости; β_0 – смещение максимума диаграммы относительно начала координат в *E*-плоскости; $\beta_{0,5}$ – ширина диаграммы в *E*-плоскости.

Введем прямоугольную систему координат (СК). Начало СК находится в центре масс носителя, ось OZ параллельна полному вектору скорости центра масс, ось OY направлена перпендикулярно вверх, ось OX образует левую СК. По оси OX будем откладывать угол азимута, по оси OY – угол места.

В начальный момент времени при отсутствии угловых эволюций и нулевой фазе поворота по крену E-плоскость диаграммы направленности антенны (ДНА) совпадает с плоскостью XOZ, соответственно, H-плоскость – с YOZ (рис. 1).

На плоскости XOY выберем некоторую материальную точку с координатами (α_c, β_c) и опишем ее движение при вращении носителя по углу крена. Для удобства перепишем координаты в комплексном виде:

$$X_c = \Delta_c e^{-j\gamma_c},$$

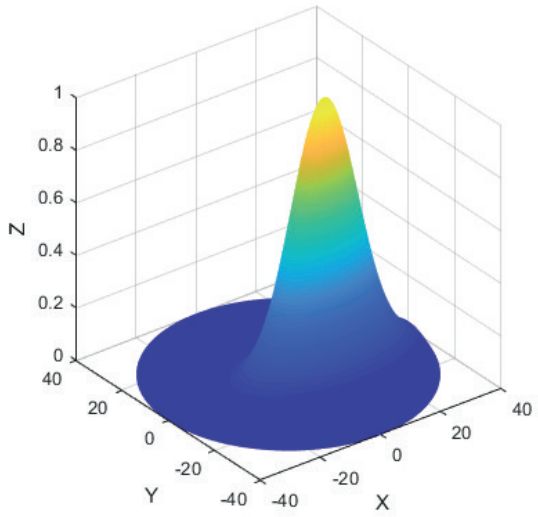


Рис. 1. Модель ДНА в координатах «азимут – угол места»

где $\Delta_c = \sqrt{\alpha_c^2 + \beta_c^2}$ – угол пеленга; $\gamma_c = \mathbf{arctg}\left(\frac{\beta_c}{\alpha_c}\right)$ – угол крена, соответствующий пеленгу.

Вращение в данном случае описывается умножением координаты на комплексную экспоненту:

$$Z_c(t) = \Delta_c e^{-j\gamma_c} e^{-j\left(\omega_\gamma t + \varphi_\gamma\right)}, \qquad (2)$$

где $\gamma = \omega_\gamma t + \varphi_\gamma$ – значение угла поворота носителя по крену в момент времени t; ω_γ – угловая скорость вращения носителя; φ_γ – начальная фаза вращения носителя.

Подставляя (2) в (1), получаем формулу, описывающую огибающую сигнала, отраженного от материальной точки в любой момент времени t:

$$G(\mathrm{Z}_c) = e^{-0{,}69\left(\frac{\mathrm{Im}(Z_c)}{\alpha_{0,5}}\right)^2} e^{-0{,}69\left(\frac{\mathrm{Re}(Z_c)-\beta_0}{\beta_{0,5}}\right)^2}. \qquad (3)$$

Рассмотрим множество точек плоскости XOY. Координаты этих точек можно описать аналитически, используя выражение

$$X\left(\Delta_p, \gamma_p\right) = \Delta_p e^{-j\gamma_p},$$

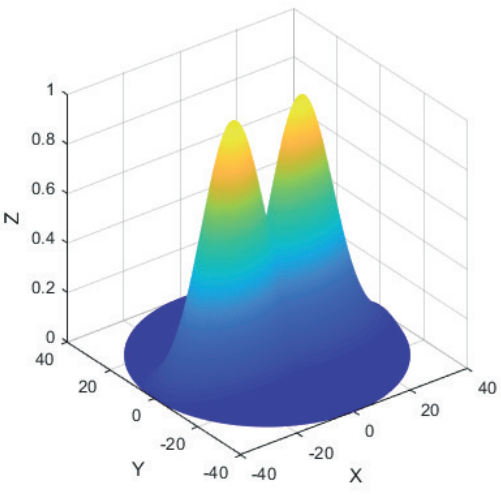
где Δ_p – координата угла пеленга; γ_p – координата угла крена.

Подставляя данное выражение в (2), получим описание координат каждой точки плоскости XOY в зависимости от поворота носителя РЛС $Z_p\left(\Delta_p, \gamma_p, \mathrm{t}\right) = \Delta_p e^{-j\gamma_p} e^{-j\left(\omega_\gamma t + \varphi_\gamma\right)}$ и, как следствие, уравнение, описывающее динамику движения ДНА в пространстве при вращении носителя:

$$G(\mathrm{Z}_p) = e^{-0{,}69\left(\frac{\mathrm{Im}(Z_p)}{\alpha_{0,5}}\right)^2} e^{-0{,}69\left(\frac{\mathrm{Re}(Z_p)-\beta_0}{\beta_{0,5}}\right)^2}. \qquad (4)$$

Для получения аналитического описания суммарно-разностной диаграммы $G_{cp}\left(\mathrm{Z}_p\right)$ необходима пара ДНА, повернутых по углу крена γ друг относительно друга на 180°. Соответственно, формирование суммарно-разностной диаграммы для момента времени t будет происходить через половину периода T_γ вращения носителя. Тогда получаем:

а)



б)

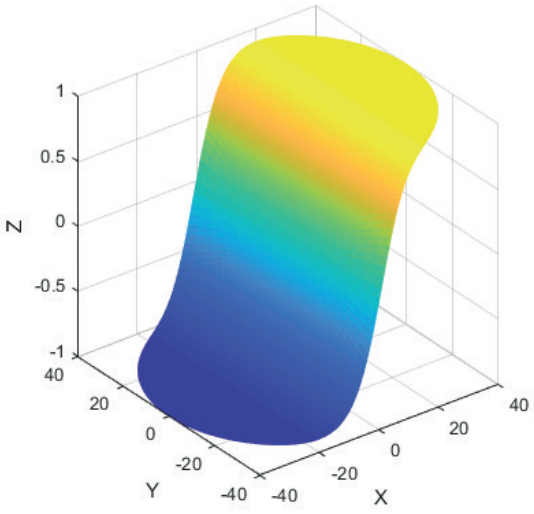


Рис. 2. Пара повернутых на 180° ДНА (а); суммарно-разностная ДНА (б)

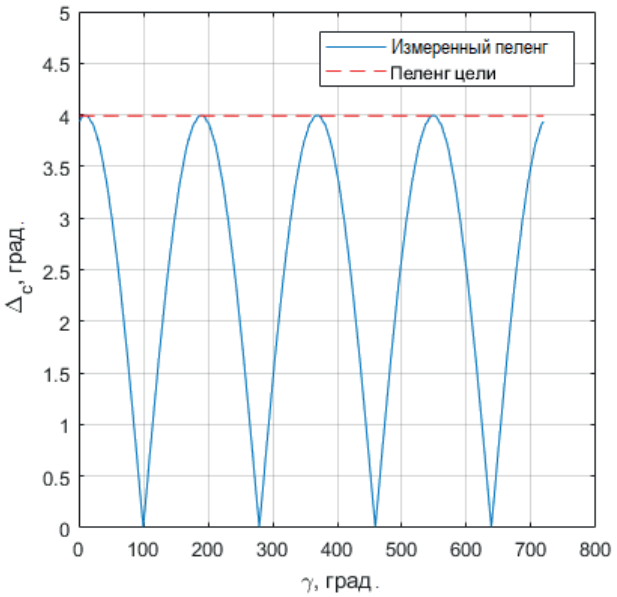


Рис. 3. График зависимости измеряемого угла пеленга от угла поворота носителя

$$G_{\text{ср}}\left(Z_p\right)=\frac{G\left(Z_p(t)\right)-G\left(Z_p\left(t+\frac{T}{2}\right)\right)}{G\left(Z_p(t)\right)+G\left(Z_p\left(t+\frac{T}{2}\right)\right)}. \qquad (5)$$

На рис. 2 представлены графики пары ДНА и суммарно-разностной диаграммы.

Проекции диаграммы $G_{\text{ср}}^{\Pi}\left(Z_p\right)$, построенной по формуле (5), на любую плоскость П, перпендикулярную равносигнальной плоскости, будут одинаковы. Плоскость из множества плоскостей П, проходящую через начало координат, назовем плоскостью пеленгации.

Получая рассогласование откликов отраженного от лоцируемого объекта сигнала в двух угловых положениях ДНА и зная значение угла поворота плоскости, используем обратную функцию к $G_{\text{ср}}^{\Pi}\left(Z_p\right)$, чтобы получить значение угла пеленга объекта для текущего значения угла поворота.

На рис. 3 представлен график зависимости угла пеленга объекта от угла поворота носителя РЛС. Значение угла пеленга лоцируемого объекта достигается, когда объект лежит в плоскости пеленгации, то есть угол поворота носителя по модулю совпадает с углом крена объекта $|\gamma|=|\gamma_c|$. Таким образом, пеленгация может производиться два раза за оборот носителя РЛС.

Рассмотрим влияние угловых эволюций носителя на работу равносигнального метода. Под эволюциями будем понимать колебания носителя по углам тангажа θ и рысканья ψ. В СК (см. рис. 1) изменение угла тангажа будет соответствовать смещению ДНА по оси OY, изменение угла рысканья – по оси OX.

В качестве модели описания динамики эволюций используем пространственный гармонический процесс:

$$Y(t)=Ae^{-j(\omega_A t+\varphi_A)}, \qquad (6)$$

где A – амплитуда угловых эволюций; ω_A – угловая скорость эволюций носителя; φ_A – начальная фаза эволюций носителя.

Вещественная часть $Y(t)$ будет характеризовать колебания носителя по углу тангажа, а мнимая – по углу рысканья.

При учете угловых эволюций описание движение ДНА примет вид

$$Z_p\left(\Delta_p,\gamma_p,t\right)=\left(\Delta_p e^{-j\gamma_p}-Ae^{-j(\omega_A t+\varphi_A)}\right)e^{-j\left(\omega_\gamma t+\varphi_\gamma\right)}.$$

Произведя замену $\gamma=\omega_\gamma t+\varphi_\gamma$, окончательно получаем:

$$Z_p\left(\Delta_p,\gamma_p,\gamma\right)= \\ =\left(\Delta_p e^{-j\gamma_p}-Ae^{-j\left(\frac{\omega_A}{\omega_\gamma}\left(\gamma-\varphi_\gamma\right)+\varphi_A\right)}\right)e^{-j\gamma}. \qquad (7)$$

Основная сложность использования равносигнального метода заключается в том, что в силу

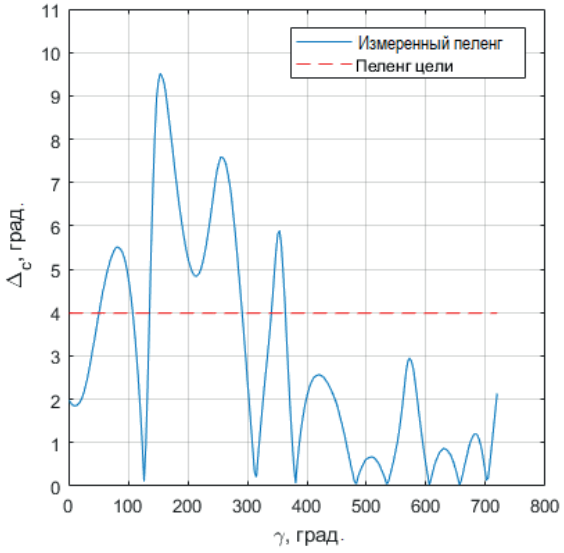


Рис. 4. График зависимости измеряемого угла пеленга от угла поворота носителя в условиях угловых эволюций без коррекции

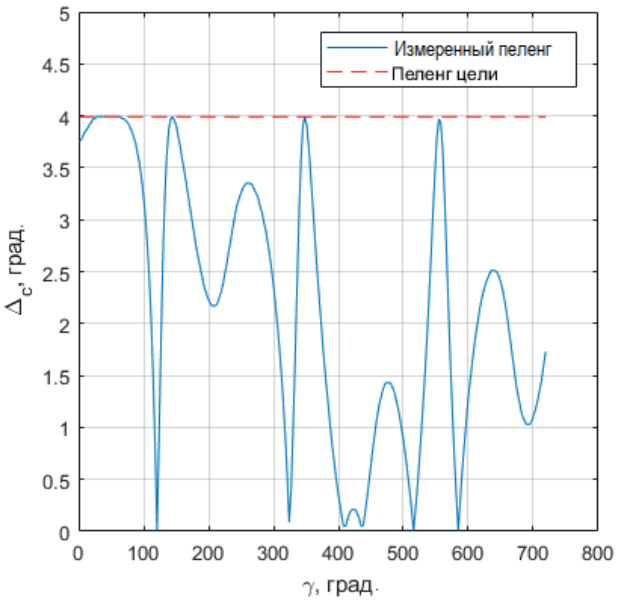


Рис. 5. График зависимости измеряемого угла пеленга от угла поворота носителя в условиях угловых эволюций с коррекцией

влияния угловых эволюций каждая из пары диаграмм, необходимых для формирования суммарно-разностной диаграммы, оказывается смещена относительно начала координат на разные значения как по оси OX, так и по оси OY.

При большом значении частоты вращения носителя РЛС в сравнении с частотой угловых эволюций $\omega_\gamma \gg \omega_A$ компенсировать влияние угловых эволюций достаточно просто [2, 3], так как разница смещений пары диаграмм оказывается пренебрежимо мала.

Рассмотрим случай, когда частоты вращения и угловых эволюций сопоставимы. Для примера используем следующие значения параметров движения носителя: $\omega_\gamma = 3$, $\varphi_\gamma = 0$, $A = 5$, $\omega_A = 2$, $\varphi_A = 0$. Из рис. 4 видно, что значения максимумов графика не равны значению пеленга цели, что приводит к большим значениям погрешности при использовании равносигнального метода пеленгации без учета влияния угловых эволюций.

На рис. 5 представлен график зависимости угла пеленга объекта от угла поворота носителя РЛС в условиях эволюций носителя с коррекцией.

Плоскость пеленгации в условиях угловых эволюций определялась как плоскость, параллельная оси OZ и проходящая через прямую, соединяющую максимумы пары ДНА. В качестве параметра суммарно-разностной диаграммы, описанной формулой (5), использовалось полученное соотношение (7).

При учете влияния угловых эволюций получаемые значения угла пеленга не превышают значения пеленга цели. При использовании описанного выше равносигнального метода пеленгации таких погрешностей, как на рис. 4, не возникает.

В данной работе с общих позиций была рассмотрена модель пеленгации объекта с использованием равносигнального метода в условиях угловых эволюций носителя РЛС.

Библиографический список

1. Радиотехнические системы / Под ред. Ю. М. Казаринова. М.: Сов. радио, 1968. 496 с.
2. *Скольник, М.* Введение в технику радиолокационных систем. М.: Мир, 1965. 748 с.
3. *Гуткин, Л. С.* Принципы радиоуправления беспилотными объектами. М.: Сов. радио, 1959. 384 с.

УДК 621.3.019.34

М. А. Артюхова
Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ БОРТОВОГО РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В статье проведено сравнение эффективности двух простейших методов структурного резервирования: нагруженного и ненагруженного дублирования при воздействии ионизирующих излучений. Также рассмотрено влияние кратности ненагруженного резервирования на вероятность безотказной работы.

***Ключевые слова**: надежность, радиационная стойкость, структурное резервирование.*

M. A. Artyukhova
Joint-stock company "Research and Production Enterprise "Radar mms"

COMPARISON OF THE EFFICIENCY OF EQUIPMENT RESERVATION

The article compares the effectiveness of two simplest methods of structural redundancy: loaded and unloaded duplication under the influence of ionizing radiation. The effect of the multiplicity of unloaded redundancy on the probability of failure-free operation is also considered.

***Keywords:** reliability, radiation resistance, structural redundancy.*

В наше время ионизирующие излучения (ИИ) сопровождают практически любую деятельность человека. Они воздействуют на радиоэлектронное оборудование (РЭО), имеющее в своей основе полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы, и приводят к изменению определяющих параметров и возникновению параметрических отказов.

Прогнозирование параметрической надежности РЭО может быть осуществлено несколькими способами: путем расчетов, вероятностным моделированием, вероятностно-физическим моделированием на специальных установках [1]. На ранних этапах проектирования чаще всего используется метод априорного анализа по вероятностным моделям [2].

Для обеспечения высоких показателей надежности невосстанавливаемого бортового радиоэлектронного оборудования применяют резервирование – способ обеспечения надежности за счет введения избыточности. Виды и методы резервирования разнообразны: применяют структурное, функциональное, временное, информационное, алгоритмическое резервирование. Это позволяет обеспечить непрерывную работу в течение времени, превосходящего среднюю наработку до отказа нерезервированного оборудования, которое отказывает только после того, как выходит из строя резервный элемент.

Показатели надежности оборудования зависят от схемы резервирования, кратности и режима функционирования резервных групп. Проанализируем, как ИИ влияют на показатели надежности резервированных систем. В качестве модели плотности распределения отказов компонентов под действием накопленной дозы используем α-распределение [3].

Рассмотрим систему с ненагруженным резервом кратностью $n=1, 2, 3$. Допустим, что процесс деградации элементов системы начинается с момента начала эксплуатации системы вне зависимости от режима работы элементов. Пусть математическое ожидание уровня стойкости основного элемента будет $m(d_{осн})=8{,}4\cdot10^3$ ед., а коэффициент вариации $\nu_{осн}=0{,}1$. Математическое ожидание уровня стойкости резервного элемента $m(d_{рез})=8{,}4\cdot10^3$ ед., коэффициент вариации $\nu_{рез}=0{,}2$. Уровень накопленной дозы за время эксплуатации – $5\cdot10^3$ ед. Функция распределения отказов такой системы определяется через суперпозицию распределений, общий вид которой представлен формулой

$$Q(t) = p_1 \cdot F_1(t) + p_2 \cdot F_2(t) + \ldots + p_n \cdot F_n, \qquad (1)$$

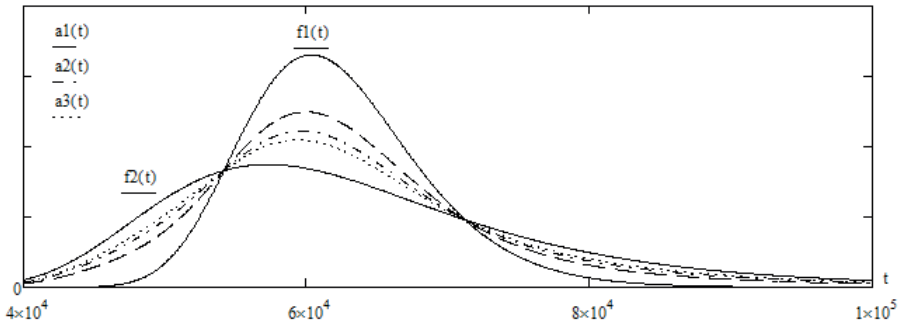


Рис. 1. Плотности вероятности отказа: f1(t) – основной элемент; f2(t) – резервный элемент; a1(t) – система с ненагруженным резервированием кратностью n = 1; a2(t) – система с ненагруженным резервированием кратностью n = 2; a3(t) – система с ненагруженным резервированием кратностью n = 3

где $F_1(t)$, $F_2(t)$,...,$F_n(t)$ – функции отказов; n – количество элементов в системе; p_1, p_2,..., p_n – весовые коэффициенты, $p_1+p_2+...+p_n=1$.

На рис. 1 приведены плотности вероятности отказа.

Результаты оценки вероятности безотказной работы (ВБР), средней наработки до отказа и наработки до начала массовых отказов системы приведены в таблице. Графики функций ВБР приведены на рис. 2.

Анализируя результаты расчетов, можно сделать вывод, что при заданных для элемента коэффициентах вариации $\nu_{осн}=0,1$ и $\nu_{рез}=0,2$ при условии одинакового значения математическо-

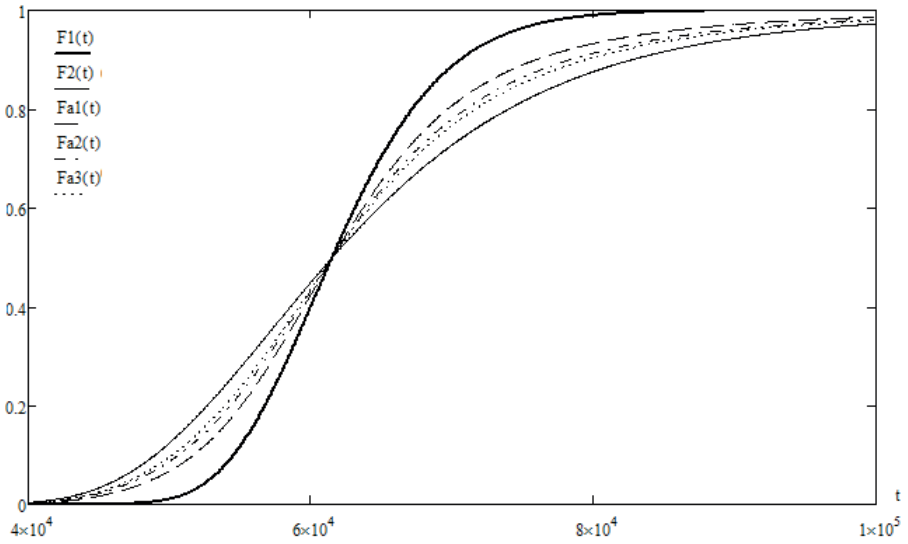


Рис. 2. Вероятности возникновения отказа: F1(t) – основной элемент, F2(t) – резервный элемент, Fa1(t) – система с ненагруженным резервом кратностью n = 1, Fa2(t) – система с ненагруженным резервом кратностью n = 2, Fa3(t) – система с ненагруженным резервом кратностью n = 3

Результаты оценки ВБР, средней наработки до отказа и наработки до начала массовых отказов системы

Показатель безотказности	Нерезервированная система (основной элемент)	Резервный элемент	Общее ненагруженное резервирование, кратность $n = 1$	Общее ненагруженное резервирование, кратность $n = 2$	Общее ненагруженное резервирование, кратность $n = 3$
ВБР за T = 43 800 ч	0,999974	0,978505	0,989239	0,985590	0,983872
Средняя наработка до отказа, ч	58 210	46 400	52 310	50 300	49 350
Наработка до начала массовых отказов, ч	50 903	41 896	42 270	42 039	41 990

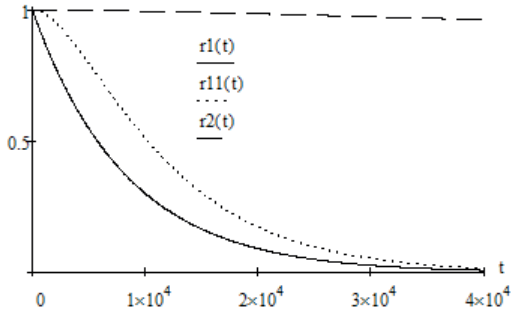


Рис. 3. ВБР системы без учета воздействия ИИ: r1(t) – нерезервированная; r11(t) – дублированная в нагруженном режиме; r2(t) – дублированная в ненагруженном режиме

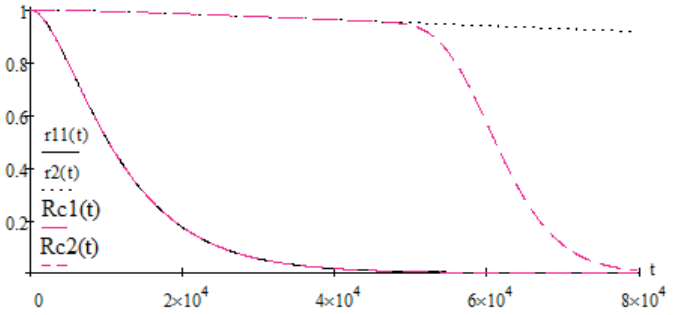


Рис. 4. ВБР с учетом влияния накопленной дозы: r11(t) – нагруженная дублированная система; Rc1(t) – нагруженная дублированная система с учетом накопленной дозы; r2(t) – ненагруженная дублированная система; Rc2(t) – ненагруженная дублированная система с учетом накопленной дозы

го ожидания уровня стойкости самая высокая ВБР будет у нерезервированной системы. Максимальная средняя наработка до отказа и наработка до начала массовых отказов также будут у нерезервированной системы.

Рассмотрим, как повлияет ИИ на ВБР дублированных нагруженной и ненагруженной систем. На рис. 3 приведены качественные зависимости ВБР без учета радиации для нерезервированной системы $r1(t)$, дублированной в нагруженном режиме $r11(t)$ и дублированной в ненагруженном режиме $r2(t)$.

Оценку влияния ИИ на показатели надежности проведем, предполагая, что процесс деградации элементов системы не зависит от режима эксплуатации.

Вероятность безотказной работы дублированной нагруженной системы $R_{c1}(t)$ при экспоненциальном распределении определяется как

$$R_{c1}(t) = \left(1 - \prod_{i=1}^{2}(1 - R_{\lambda_i})\right) \cdot R_D(t) = \left(2e^{-\lambda_1 t} - e^{-2\lambda_1 t}\right) R_D(t),$$

где λ_1 – ИО в режиме работы, отказ/ч; $R_D(t)$ – ВБР при воздействии ИИ.

Вероятность безотказной работы дублированной ненагруженной системы при экспоненциальном распределении определяется выражением [1]

$$R_{c2}(t) = \left(R_{\lambda 1}(t) + \int_0^t R_{\lambda 2}(t-\tau) \cdot f_{\lambda 1}(\tau) d\tau\right) R_D(t) = \left(e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}\left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right)\right) R_D(t),$$

где λ_2 – ИО в режиме хранения, отказ/ч.

На рис. 4 приведены качественные графики ВБР с учетом влияния накопленной дозы.

Очевидно, «холодное» дублирование системы дает ощутимый выигрыш в показателях надежности, и в этом случае безотказность системы определяется показателями радиационной стойкости. Эффективность резервирования тем выше, чем надежнее основная группа.

Этап составления математической модели – самое слабое звено в расчетах надежности проектируемых объектов. Вид математической модели определяет возможность получения расчетных формул.

Предложенная математическая модель учета влияния накопленной дозы на показатели надежности бортового РЭО позволяет при оценке показателей безотказности электронной компонентной базы учесть не только скорость внутренних процессов разрушения, но и факторы радиационной нагрузки.

Библиографический список

1. *Дружинин, Г. В.* Надежность автоматизированных производственных систем. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986. 480 с.
2. *Грибов, В. М.* Оценивание и прогнозирование надежности бортового аэрокосмического оборудования / В. М. Грибов, Ю. Н. Кофанов, В. П. Стрельников; под отв. редакцией проф. НИУ ВШЭ Ю.Н. Кофанова. Нац. исслед. Ун-т «Высшая школа экономики», МИЭМ. М.: НИУ ВШЭ, 2013. 496 с.
3. *Артюхова, М. А.* Прогнозирование показателей надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов при воздействии ионизирующих излучений низкой интенсивности / М. А. Артюхова, В. В. Жаднов // Надежность. 2015. № 1. С. 13–18.

УДК 66.022.54

А. Б. Попова
инженер-технолог
Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»

МАРШРУТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ПЛАТ С НАИМЕНЬШИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ЗАТУХАНИЯ

В статье исследовано влияние маршрутов изготовления многослойных микрополосковых плат на коэффициент затухания.

***Ключевые слова**: микрополосковая структура, фотолитография, коэффициент затухания.*

A. B. Popova
Processing Engineer
Joint-stock company "Research and Production Enterprise "Radar mms"

PRODUCTION ROUTE FOR MULTI-LAYER MICROSTRIP BOARDS WITH LOWEST ATTENUATION CONSTANT

In the article it is presented the influence of multi-layer microstrip boards production rout on the attenuation constant.

***Keywords:** microstrip structure, photolithography, attenuation constant.*

В реальных микрополосковых структурах, сформированных по различным технологическим маршрутам, выявлено значительное различие в коэффициентах затухания. В табл. 1 приведены результаты расчета и измерения коэффициента затухания в полосковой линии на подложке из поликора. Коэффициент затухания измерен методом кольцевого резонатора на частотах 8–12 ГГц на двух вариантах технологии изготовления полосковой линии.

Таблица 1

Сравнение результатов расчета и измерения коэффициента затухания

Структура полосковой линии	Частота, ГГц	Результаты измерения, α, дБ/м	Результаты расчета, α, дБ/м	
			без учета шероховатостей	с учетом шероховатостей
Cr–$Cu_{вак}$ (5 мкм)	8	5,5	4,5	5,3
	10	6,3	5,0	6,0
	12	7,3	5,5	6,7
Cr–$Cu_{вак}$ (1 мкм) – $Cu_{эл/хим}$ (5 мкм)	8	6,1	4,5	5,9
	10	6,8	5,0	6,7
	12	7,7	5,5	7,5

В первом случае на подслой хрома с R_s=100 Ом/кв наносили медь толщиной 5 мкм за единый вакуумный цикл. Удельное сопротивление меди составляет $1{,}75 \cdot 10^{-6}$ Ом/см^3. При расчете взято табличное значение удельного сопротивления меди. Расхождение результатов расчета и измерений без учета микронеровностей достигло 30%. Это расхождение существенно снижается, если учесть влияние микронеровностей. Шероховатость полированного поликора в 0,04 мкм соответствует коэффициенту шероховатости $К_{1,3}$=1,04. С учетом этого фактора расхождение результатов расчета и измерения не превышает 9%.

Во втором варианте на подложку термическим испарением в вакууме нанесен хром R_s=100 Ом/кв и медь толщиной 1 мкм, после чего методом фотолитографии сформирован рисунок схемы. Затем увеличение толщины слоя меди на 4 мкм проводилось при помощи электрохимического осаждения. При расчете не учитывалась шероховатость и реальное удельное сопротивление меди, таким образом, расхождение с результатами измерений достигает 30%.

На практике значение удельного сопротивления меди при толщине покрытия 4 мкм составляет $2{,}3 \cdot 10^{-6}$ Ом/см^3. Учитывая шерохова-

тость осажденной меди (0,25 мкм), которой соответствуют коэффициенты шероховатости $К_{1(10)}=1{,}19$, $К_{1(12)}=1{,}21$, расхождение результатов расчета и измерения не превышает 8%.

Из табл. 1 следует, что различие результатов и расчетов потерь не превышает 9%, что позволяет с приемлемой для практики точностью определять влияние различных покрытий микрополосковой платы на коэффициент затухания.

К микрополосковым платам помимо высоких требований к уровню потерь предъявляются жесткие ограничения по точности размеров. Для обеспечения удовлетворительной разрешающей способности и воспроизводимости размеров толщина полосковой линии должна быть как можно меньше. Для каждого частотного диапазона существует оптимальное соотношение толщин меди и золота. В частотном диапазоне 2–12 ГГц различий в уровне потерь при толщине полосковых линий 8 и 13 мкм нет, а толщина меди 3–6 мкм обеспечивает высокий уровень СВЧ-параметров.

Воспроизводимость коэффициента затухания определяется шероховатостью края, воспроизводимостью толщин покрытий, воспроизводимостью удельного сопротивления. Выявлено, что при травлении вакуумной меди толщиной 5 мкм травителем состава $HCl : H_2O_2 : H_2O = 1 : 1 : 9$ шероховатость края составила $R_a < 1$ мкм. При такой шероховатости разброс потерь коэффициента затухания не превышает 1 дБ/м. А при травлении такого же образца вакуумной меди травителем состава $Cr_2O : H_2SO_4 : H_2O = 5 : 1 : 2$ шероховатость края составила R_a=(2–3) мкм, а уровень потерь – 1,7 дБ/м (табл. 2).

Таблица 2

Влияние структуры полосковой линии на величину и разброс коэффициента затухания

Структура	Разброс коэффициента затухания, α, дБ/м	Уровень коэффициента затухания, α, дБ/м
Cr-$Cu_{вак}$ (5 мкм), $R_a < 1$	1	5–6
Cr-$Cu_{вак}$ (5 мкм), R_a= (2–3)	1,7	7,8–8,5
Cr-$Cu_{вак}$ (1 мкм) – $Cu_{эл/хим}$ (4 мкм)	1,5	5,4–6,8
Cr-$Cu_{вак}$ (1 мкм) – $Cu_{эл/хим}$ (4 мкм) – $Ni_{эл/хим}$ (0,4 мкм) – $Au_{эл/хим}$ (2 мкм)	1,5	5,5–8,5
Cr-$Cu_{вак}$ (1 мкм) – $Cu_{эл/хим}$ (4 мкм) – $Ni_{эл/хим}$ (0,4 мкм) – $Au_{эл/хим}$ (3 мкм)	1,0	6,2–7,2

Из табл. 2 следует, что с увеличением толщины золотого покрытия структуры снижается не только уровень потерь, но и разброс значений коэффициента затухания.

Учитывая вышеизложенные факторы, был предложен оптимальный технологический маршрут.

На подложку из поликора в едином вакуумном цикле напыляют проводящий слой, который состоит из адгезионного слоя хрома R_s=100 Ом/кв и меди толщиной 1–1,5 мкм. Технологические перемычки и топологию проводников образуют из проводящего слоя многослойной структуры при помощи фотолитографии с последующим селективным травлением проводящего слоя.

После формирования проводников и технологических перемычек наносят фоторезист для формирования фоторезистивной маски «Изоляция», которая изолирует технологические перемычки от контакта с электролитом. После чего подложку со сформированными на ней проводниками и изолирующей маской на технологических перемычках передают на операцию электрохимического осаждения обходимых металлических слоев.

После электрохимического осаждения фоторезистивная изолирующая маска удаляется в растворителях. Открытые технологические перемычки подвергаются селективному химическому травлению, которое приводит к формированию топологии необходимой схемы.

Предложенный маршрут минимально снижает коэффициент затухания за счет возможности точного воспроизведения необходимых геометрических размеров проводника, также снижен вклад в рост коэффициента затухания шероховатости края, так как формирование топологии ведется по слою вакуумной меди толщиной не более 1,5 мкм.

Библиографический список

1. *Выморков, Н. В.* Влияние формы проводника на коэффициент затухания / Н. В. Выморков, И. И. Климачев, З. Д. Ковтунова, Р. А. Силин // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1988. Вып. 4 (408). С. 6–9.
2. Способ изготовления плат гибридных интегральных схем: пат. 2342812 Рос. Федерация / Крючатов В. И. Приоритет 27.12.2008.
3. *Климачев, И. И.* Разработка конструкции и технологии микрополосковых плат для бесфлюсовой сборки ГИС СВЧ с высокой воспроизводимостью параметров и надежности изделий: дис. ... канд. технич. наук. Фрязино: ФГУП «НПП „Исток“», 2005. С. 167.

УДК 621.3.019.34

М. А. Артюхова
Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»

УЧЕТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ ИМПУЛЬСНОГО ХАРАКТЕРА НА ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ

В статье предложена математическая модель для учета воздействия ионизирующего излучения импульсного характера на показатели надежности радиоэлектронного оборудования.

***Ключевые слова**: экспозиционная доза, вероятность безотказной работы.*

M. A. Artyukhova
Joint-stock company "Research and Production Enterprise "Radar mms"

ACCOUNTING THE EFFECTS OF IMPULSE IONIZING RADIATION ON EQUIPMENT FAILURE INDICATORS

The article proposes a mathematical model for taking into account the effect of impulsive ionizing radiation on the reliability indices of electronic equipment.

***Keywords:** exposure dose, probability of failure-free operation.*

Одна из главных целей при проектировании радиоэлектронного оборудования (РЭО) – это создание оборудования стойкого, прочного и устойчивого к влиянию внешних воздействующих факторов. Чем выше требования к допустимым уровням воздействующих факторов по техническому заданию, тем выше показатели безотказности оборудования при реальной эксплуатации.

К внешним воздействующим факторам относятся в том числе и радиационные факторы. В их состав входят ионизирующие излучения (ИИ), существующие в космическом пространстве и создаваемые энергетическими установками и ядерным взрывом. Воздействие ИИ на РЭО может носить импульсный характер и продолжаться от нескольких наносекунд до нескольких минут, или непрерывный в течение всего срока эксплуатации [1].

Для того чтобы разработчик мог определить, насколько успешно будет функционировать создаваемое им оборудование в условиях воздействия ИИ, необходимо иметь представление о характеристиках среды и вызываемых ее воздействием нарушениях в работе РЭО. Подобная информация часто носит ориентировочный характер.

Рассмотрим вопрос влияния на показатели надежности ИИ импульсного характера, в частности, экспозиционной дозы. Основными особенностями импульса ИИ является его малая продолжительность и высокая мощность излучения. В связи с этим модель вероятности безотказной работы (ВБР) (или вероятности сохранения работоспособности, если речь идет о прочности РЭО) можно представить в виде

$$R(t) = R_{\lambda}(t) \cdot R_D, \qquad (1)$$

где $R_{\lambda}(t)$ – ВБР без воздействия ИИ; $R_D = 1 - F_D$ – ВБР при воздействии импульса излучения; t – время эксплуатации.

Для описания воздействий импульсного характера принято использовать следующие характеристики: D – экспозиционная доза, ед. и P – мощность экспозиционной дозы, ед/с.

Отказ элемента или системы наступает тогда, когда некий определяющий параметр достигает своего граничного значения.

Для 10-кратного ослабления мгновенных γ-квантов необходим экран, обеспечивающий величину массовой защиты порядка 70–75 г/см^2, что эквивалентно толщине стального экрана порядка 9,3 см (плотность стали 7,84 г/см^3). Для такого же ослабления вторичных γ-квантов необходим экран порядка 100–107 г/см^2, что приблизительно равняется 13,3 см стали. В связи с этим обеспечение стойкости бортового оборудования по естественным причинам ограниче-

ний на массу и габаритные размеры становится весьма сложной задачей.

Согласно моделям [2] граничное значение определяющего параметра $П_{гр}$ будет равно

$$П_{гр} = 2 \cdot m(d) - D, \quad (1)$$

где $m(d)$ – математическое ожидание уровня стойкости элемента, ед.; D – полная экспозиционная доза, ед.

В случае импульсного воздействия D не зависит от времени. Применим α-распределение для описания плотности возникновения отказа. Данное распределение характеризуется параметрами α – относительная средняя скорость изменения параметра, или коэффициент однородности скорости изменения параметра, и β – относительный запас долговечности. Тогда плотность возникновения отказа будет описываться выражением

$$f(t) = \frac{\beta}{t^2\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\beta}{t}-\alpha\right)^2}. \quad (2)$$

Вероятность возникновения отказа за время, равное времени воздействия импульса $\tau_и$, будет

$$F_D = \int_0^{\tau_и} \frac{\beta}{t^2\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\beta}{t}-\alpha\right)^2}.$$

Тогда ВБР, соответственно, можно найти из выражения

$$R(t) = R_\lambda(t) \cdot \left(1 - \int_0^{\tau_и} \frac{\beta}{t^2\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\beta}{t}-\alpha\right)^2}\right). \quad (3)$$

Для импульсного облучения характерны кратковременные эффекты смещения, которые приводят к обратимым изменениям параметров изделия. Из-за высокой скорости рекомбинации значительная доля созданных дефектов после прекращения облучения отжигается. Отжиг изменений параметров полупроводниковых приборов и интегральных схем происходит в несколько стадий. Полный отжиг наблюдается при температурах, значительно превышающих рабочие температуры (более 250 °С) [3].

На практике часто используют комплексные показатели надежности. Коэффициент готовности $К_г(t)$ – вероятность того, что изделие окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов. Обычно применяют асимптотическое значение функции $К_г(t)$ [4]:

$$К_Г = \lim_{t\to\infty} К_Г(t).$$

В нашем случае $К_г$ представляет собой вероятность того, что изделие сохранит работоспособность после воздействия на него ИИ импульсного характера и его можно оценить, используя выражение

$$К_Г = \sqrt[3]{R_{\lambda раб}(t_{раб}) \cdot R_{\lambda хр}(t_{хр}) \cdot R_D}, \quad (4)$$

где $R_{\lambda раб}(t_{раб})$ – вероятность сохранения работоспособности за время работы $t_{раб}$; $R_{\lambda хр}(t_{хр})$ – вероятность сохранения работоспособности за время хранения $t_{хр}$.

Формула (4) представляет собой «общий случай», включающий весь средний ресурс изделия, и характеризует значение коэффициента готовности в момент сразу после воздействия. Часть радиационных дефектов после прекращения воздействия отжигается, если не происходит необратимых изменений, и значение $К_г$ будет стремиться к $К_Г = \sqrt{R_{\lambda раб}(t_{раб}) \cdot R_{\lambda хр}(t_{хр})}$ при отсутствии воздействия.

Библиографический список

1. *Мырова, Л. О.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. 2-е изд., перераб. и доп. / Л. О. Мырова, А. З. Чепиженко. М.: Радио и связь, 1988. 296 с.
2. *Артюхова, М. А.* Прогнозирование показателей надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов при воздействии ионизирующих излучений низкой интенсивности / М. А. Артюхова, В. В. Жаднов // Надежность. 2015. № 1. С. 13–18.
3. *Таперо, К. И.* Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения / К. И. Таперо, В. Н. Улимов, А. М. Членов. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2012. 304 с.
4. *Грибов, В. М.* Оценивание и прогнозирование надежности бортового аэрокосмического оборудования / В. М. Грибов, Ю. Н. Кофанов, В. П. Стрельников; под отв. редакцией проф. НИУ ВШЭ Ю. Н. Кофанова. М.: НИУ ВШЭ, 2013. 496 с.

УДК 614.842.435

А. Е. Романов
ведущий инженер
Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»
В. М. Кондратьев
студент
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) СПб ГЭТУ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИНДУКЦИОННОГО ПОЖАРНОГО ИЗВЕЩАТЕЛЯ ДЛЯ СВЕРХРАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПОЖАРООПАСНОЙ СИТУАЦИИ

В статье рассмотрено использование электроиндукционного пожарного извещателя для сверхраннего обнаружения пожароопасной ситуации.

***Ключевые слова**: электроиндукционный пожарный извещатель.*

A. E. Romanov
Leading Engineer
Joint-stock company "Research and Production Enterprise "Radar mms"
V. M. Kondratev
Student
Saint-Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V. I. Ulyanov (Lenin)

USE OF THE ELECTRIC-INDUCTION FIRE DETECTOR FOR THE SUPER-CURRENT DETECTION OF THE FIRE-ALERT SITUATION

The article considers the use of the electro-induction fire detector for supper-current detection of fire-alert situation.

***Keywords:** electric-induction fire detector.*

Введение

В данной работе была исследована возможность использования электроиндукционного пожарного извещателя для сверхраннего обнаружения пожароопасной ситуации. Электроиндукционный пожарный извещатель представляет собой подвид пожарных дымовых ионизационных извещателей, принцип действия которого основан на индуцировании электрического потенциала частицами дыма, получившими заряд в поле коронного разряда. Была создана экспериментальная методика испытания прибора. Показана перспектива применения для сверхраннего обнаружения пожароопасной ситуации.

Актуальность применения электроиндукционных пожарных извещателей в пожарных системах жилых и промышленных объектов продиктована необходимостью раннего предупреждении пожароопасных ситуаций. Заблаговременное обнаружение потенциального очага возгорания позволяет в большинстве случаев предотвратить возникновение возгорания, обеспечивая снижение риска повреждения оборудования, нанесения ущерба зданиям и сооружениям, а также причинения вреда здоровью и жизни людей.

В отличие от оптико-электронных дымовых пожарных извещателей электроиндукционные извещатели чувствительны к высокодисперсным аэрозолям с размерами частиц до 0,1 мкм. Источником ионизации является высоковольтный разряд, поэтому к эксплуатации и утилизации не предъявляются такие жесткие требования, как к радиоизотопным ионизационным пожарным извещателям.

Целью работы являлась оценка возможности сверхраннего обнаружения пожароопасной ситуации с помощью электроиндукционного по-

жарного извещателя. Для реализации данной цели были изучены физические подходы к описанию аэрозольного состояния вещества, его поведения в сильном электрическом поле, создана лабораторная установка и методика проведения экспериментального изучения характеристик дымовых извещателей.

Теоретические основы электроиндукционной технологии

Извещатель пожарный дымовой электроиндукционный (ИПДЭ) – извещатель пожарный дымовой (ИПД), принцип действия которого основан на индуцировании электрического потенциала частицами дыма (аэрозоля), получившими электрический заряд при прохождении через область ионизации [1]. Аэрозоль (частицы, выделяющиеся на ранних стадиях термического разложения материалов) из защищаемого помещения принудительно поступает в измерительную линию ИПДЭ, схематично изображенную на рис. 1. В измерительной линии последовательно по потоку установлены зарядная и измерительная камеры. Проходя через зарядную камеру, аэрозольные частицы получают электрический заряд от высоковольтного коронного разряда. Заряд каждой такой частицы можно оценить при помощи выражения

$$Q = Ar^2 + Br, \qquad (1)$$

где Q – заряд; A – постоянная ударной зарядки; r – радиус частицы; B – постоянная диффузионной зарядки.

Проходя через измерительную камеру, заряженные частицы индуцируют электрический потенциал, пропорциональный концентрации аэрозоля.

На основе проведенных экспериментальных исследований [2] можно сделать вывод, что при термическом разложении полимерных материалов в образующемся аэрозольном облаке больше всего (до 90%) частиц размером 0,01–0,1 мкм (высокодисперсные аэрозоли). Также частицы указанного размера достигают счетной концентрации, на несколько порядков превышающей фон, при температурах нагрева на 250–300 К ниже температуры воспламенения материалов – источников аэрозоля. При одинаковых весовых концентрациях суммарный заряд от высокодисперсных частиц получается существенно выше, чем от грубодисперсных частиц, вследствие чего ИПДЭ в теории должен иметь повышенную чувствительность к высокодисперсному аэрозолю.

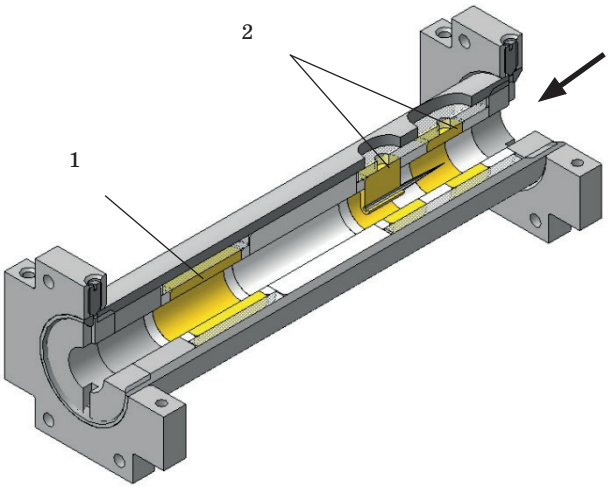


Рис. 1. Конструкция измерительной линии электроиндукционного пожарного извещателя: 1 – зарядная камера; 2 – измерительная камера

Большой проблемой является то, что аэрозольные системы не бывают устойчивы, в них всегда присутствуют процессы переноса, конвекции, вихревые потоки и иные факторы. Таким образом, аэрозольные измерения могут носить только статистический характер, а точность измерений повышается при увеличении спектра размеров анализируемых частиц и объема забираемой пробы. Первое условие трудноосуществимо из-за необходимости обеспечения высокой чувствительности к высокодисперсным аэрозолям, второе условие ограничено оптимальными конструктивными параметрами измерительной линии и мощностью побудителя расхода аэрозоля.

Также интерес представляет поведение частиц аэрозоля в сильном электрическом поле, создаваемом коронирующим электродом. Частицы аэрозоля могут иметь заряд, в трудах Х. Ф. Таммета они носят название аэроионы [3]. Средняя скорость движения аэроионов $\vec{\vartheta}$ под действием электрического поля пропорциональна напряженности поля $\vec{E}$:

$$\vec{\vartheta} = R \cdot \vec{E}, \qquad (2)$$

где R – подвижность аэроионов, величина положительная для положительно заряженных аэроионов и отрицательная для отрицательно заряженных. Точка введена для обозначения подвижности как полярной величины, здесь и далее запись без точки означает переход к абсолютному значению.

Наибольший размер частиц, рассматриваемых как аэроионы, должен соответствовать зна-

чению, при котором можно пренебречь силой тяжести и инерцией частиц:

$$m \le \frac{q \cdot E}{g + R \cdot \left(\frac{d\vec{E}}{dt} \right)}, \qquad (3)$$

где m – масса частиц; g – ускорение свободного падения; q – абсолютное значение заряда частицы.

Такое описание аэроионов приемлемо только при пренебрежении химической природой аэрозоля и массой носителей заряда, что применимо к электрическим процессам, проходящим в воздухе.

Для описания ионизированного воздуха вводится понятие дифференциальной спектральной функции распределения плотности заряда по подвижностям:

$$\rho(\underset{\cdot}{R}) = \frac{\partial \rho}{\partial \underset{\cdot}{R}}, \qquad (4)$$

где $\partial\rho$ – плотность заряда, обусловленная аэроионами с подвижностями в промежутке между R и $R + \partial R$. Промежуток значений подвижностей от R до $R + \partial R$ обозначим как $(\underset{\cdot 1}{R}, \underset{\cdot 2}{R})$ и проинтегрируем спектральную функцию распределения плотности заряда на данном промежутке:

$$\rho(\underset{\cdot 1}{R}, \underset{\cdot 2}{R}) = \int_{\underset{\cdot 1}{R}}^{\underset{\cdot 2}{R}} \rho(\underset{\cdot}{R}) d\underset{\cdot}{R}. \qquad (5)$$

Для описания спектрального распределения аэроионов обеих полярностей необходимо вводить $\rho_+(R_1, R_2)$ и $\rho_-(R_1, R_2)$, тогда, если заряд каждого аэроиона равняется одному элементарному заряду, то можно оценить счетную концентрацию аэроионов как

$$n_{\pm}(R_1, R_2) = \frac{\rho_{\pm}(R_1, R_2)}{e}. \qquad (6)$$

Предположение, что $q = e$, справедливо только для легких аэроионов, тяжелые аэроионы и созданные в поле коронного разряда заряженные частицы аэрозоля могут иметь больший заряд, поэтому выражение (6) не дает правильное счетное значение концентрации, но позволяет оценить ее в некоторых условных единицах.

Экспериментальные исследования

При помощи установки, конструкция которой схематично представлена на рис. 2, был проведен эксперимент, целью которого являлось определение возможности сверхраннего обнаружения очага пожара до возникновения огня.

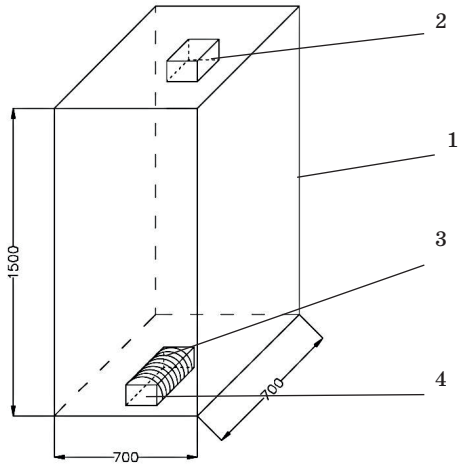


Рис. 2. Схема установки:
1 – стеклянная газовая камера;
2 – извещатель пожарный электроиндукционный ИП-213; 3 – источник аэрозоля – провод ПВ-3 1×0,5;
4 – резистивный нагреватель

Методика эксперимента заключалась в следующем. В стеклянной камере (1) в верхней части на высоте 1,5 м размещен извещатель пожарный дымовой электроиндукционный ИП-213 (2), источником аэрозоля является провод ПВ3 1×0,5 (3). Изоляция провода нагревалась при помощи резистивного нагревателя (4), плавная подача напряжения осуществлялась при помощи источника питания Mastech HY3005D, температура источника аэрозоля в процессе эксперимента контролировалась при помощи термопары К-типа и мультиметра Mastech MY64.

На персональный компьютер по интерфейсу RS-232 передавался выходной сигнал извещателя. Нагрев источника аэрозоля проводился

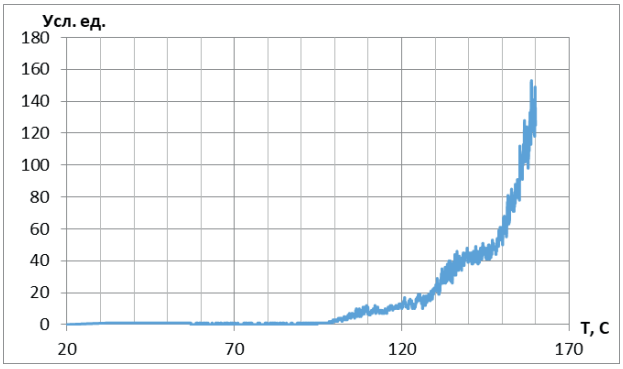


Рис. 3. Зависимость выходного сигнала ИП 213-001 от температуры источника аэрозоля

от 20 до 160 °С до образования видимого дыма. В результате была определена экспериментальная зависимость выходного сигнала электроиндукционного извещателя от температуры источника аэрозоля, представленная на рис. 3.

На основе полученной в результате эксперимента зависимости (рис. 3) можно сделать вывод, что извещатель регистрировал существенное увеличение концентрации аэрозоля уже при нагреве источника аэрозоля до 100 °С – температуры, существенно меньшей температуры воспламенения кабеля. При этом видимое задымление камеры наблюдалось при достижении нагрева источника аэрозоля до 150 °С.

Заключение

Электроиндукционные дымовые пожарные извещатели имеют на несколько порядков более высокую чувствительность по сравнению со стандартными оптико-электронными извещателями и позволяют обнаружить пожароопасную ситуацию задолго до возникновения пожара. Благодаря повышенной чувствительности к высокодисперсным (менее 0,1 мкм) аэрозольным частицам, выделяющимся на ранних стадиях термической деструкции материалов, ИПДЭ превосходит по времени обнаружения пожароопасной ситуации большинство иных дымовых извещателей.

Внедрение ИПДЭ позволит существенно снизить риски возникновения возгорания и избежать катастрофических последствий, вызываемых пожарами.

Библиографический список

1. *Романов, А. Е.* Разработка аспирационного пожарного извещателя сверхраннего обнаружения пожароопасной ситуации / А. Е. Романов, А. В. Голиков // Актуальные проблемы военной науки и политехнического образования ВМФ. Часть IV. СПб.: ВМПИ, 2015. С. 233–240.
2. *Алексеев, В. А.* О физической модели образования аэрозольных частиц при термоокислительной деструкции полимерных материалов / В. А. Алексеев, О. В. Косовцев, В. Л. Чигарев, В. С. Григорьев // Методы и приборы биоинформации и контроля окружающей среды: межвуз. сб. Л.: ЛИАП, 1981. Вып. 150.
3. *Таммет, Х. Ф.* Труды по аэроионизации и электроаэрозолям 2. Аспирационный метод измерения спектра аэроионов: ученые записки Тартуского государственного университета. Тарту, 1967. Вып. 195. С. 3–10.

УДК 532.517.4

А. М. Балонишников
доктор технических наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
А. О. Старобогатов
кандидат физико-математических наук
Ленинградский государственный университет имени А. С. Пушкина

ВЫВОД УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ДИССИПАЦИИ ИЗ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ТУРБУЛЕНТНОЙ ВЯЗКОСТИ

Предложен вывод уравнения переноса диссипации из уравнения переноса турбулентной вязкости, используя выражение для турбулентной вязкости через диссипацию и градиенты осредненной скорости в приближении локального баланса энергии турбулентности. Приведен вывод уравнения переноса диссипации в предположении существенного разделения масштабов осредненной скорости и диссипации.

***Ключевые слова**: турбулентная вязкость, удельная скорость диссипации турбулентной энергии.*

A. M. Balonishnikov
PhD. Tech., Professor
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
A. O. Starobogatov
PhD. Phys.-Math.
Leningrad State University named after A.S. Pushkin

DERIVATION OF TRANSPORT EQUATION FOR DISSIPATION FROM TRANSPORT EQUATION FOR TURBULENT VISCOSITY

Transport equation for dissipation is derived from transport equation for turbulent viscosity, using expression for turbulent viscosity through dissipation and gradients of large-scale velocity, assuming validity of local turbulent energy balance.

***Keywords:** turbulent viscosity, rate of turbulent kinetic energy dissipation, one-equation models of turbulence.*

Введение

Однопараметрические модели турбулентности играют особую роль среди многопараметрических моделей турбулентности, поскольку эти модели содержат только одно дополнительное уравнение переноса к уравнениям Рейнольдса. В силу этого члены, входящие в состав этого уравнения, имеют более прозрачный физический смысл. С другой стороны, такие однопараметрические модели имеют меньшее число подгоночных параметров и в случае удовлетворительного согласия с экспериментом заслуживают большего доверия.

К однопараметрическим моделям турбулентности можно отнести модели переноса удельной скорости диссипации турбулентной энергии [1–8] или турбулентной вязкости [9–11]. Особую роль и особую трудность представляет параметризация уравнения переноса удельной скорости диссипации турбулентной энергии. Именно эта величина определяет энергетический спектр мелкомасштабных скоростей в инерционном интервале (закон 5/3 Колмогорова) и экспоненциальное убывание в интервале диссипации.

Основной спектральный вклад в диссипацию турбулентной энергии осуществляют вихри, находящиеся на границе интервала диссипации и инерционного интервала (порядка масштаба Тейлора). Приближенное аналитическое выражение для скорости, не говоря уже о точном, для таких вихрей очень сложно получить аналитически. С одной стороны, динамика таких вихрей, по-видимому, существенно нели-

нейна. С другой, следует ожидать некоторую зависимость динамики этих вихрей от градиентов крупномасштабной (средней) скорости.

Различные теоретические подходы к построению уравнения переноса диссипации (в том числе для замыкания турбулентности в рамках многопараметрических моделей) были предложены в работах [4–7]. В связи со сложностью данной задачи Хамба [9] предложил выписать уравнение переноса диссипации, исходя из уравнения переноса турбулентной вязкости, но эта задача не была им реализована. Предложим в этой работе свое решение этой задачи.

Переход от уравнения переноса турбулентной вязкости к уравнению переноса диссипации

Хамба получил [9] следующее уравнение переноса турбулентной вязкости ν_t:

$$\frac{D\nu_t}{Dt} = c_{b1}\Omega\nu_t - c_{w1}f_w\left(\frac{\nu_t}{d}\right)^2 + \\ + \frac{1}{\sigma}\frac{\partial}{\partial x_i}(\nu_t\frac{\partial\nu_t}{\partial x_i}) + \frac{c_{b2}}{\sigma}\frac{\partial\nu_t}{\partial x_i}\frac{\partial\nu_t}{\partial x_i}, \quad (1)$$

где $c_{b1}, c_{b2}, c_{w1}, \sigma$ – безразмерные константы, Ω – величина осредненной завихренности, f_w – безразмерная функция, $f_w \approx 1$ вдали от стенки, d – расстояние до ближайшей стенки, $\nu_t >> \nu$ вдали от стенки и ν – молекулярная вязкость.

Для вывода уравнения переноса удельной скорости диссипации турбулентной энергии (ε) воспользуемся приближением локального баланса [2] для связи этой величины и турбулентной вязкости:

$$\nu_t = \frac{\varepsilon}{S^2}, \quad (2)$$

где инвариант тензора-градиента средней скорости

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (3)$$

(по повторяющимся индексам – суммирование), компоненты тензора – градиента

$$S_{ij} = \frac{1}{2}(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}). \quad (4)$$

Соотношение (3) можно также переписать как

$$S = \sqrt{\frac{\partial U_j}{\partial x_i}(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i})}. \quad (5)$$

Уравнение Рейнольдса при использовании параметризации (2) принимает вид

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p^*}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\nu_t(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i})], \quad (6)$$

модифицированное давление $p^* = \frac{P}{\rho} + \frac{< u_j u_j >}{3}$, $< \ldots >$ – операция осреднения по ансамблю, пространству или времени, P – крупномасштабное (осредненное) давление, ρ – плотность ($\rho = \text{const}$), u_j – компонента мелкомасштабной скорости, $j = 1, 2, 3$. Поскольку предполагается, что жидкость несжимаема, то выполняется уравнение (условие) несжимаемости:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0. \quad (7)$$

Перейдем в систему координат, двигающуюся со средней скоростью U. В этой инерциальной двигающейся системе координат $U = 0$.

Из соотношения (2) получаем выражение для удельной скорости диссипации:

$$\varepsilon = \nu_t S^2. \quad (8)$$

Из этого соотношения, дифференцируя величину ε по времени, получим

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial\nu_t}{\partial t}S^2 + \nu_t\frac{\partial S^2}{\partial t}. \quad (9)$$

Используя соотношения (1), (5), (6), опуская промежуточные выкладки для взятия пространственных производных, окончательно получим уравнение переноса удельной скорости диссипации турбулентной энергии:

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial t} + U_j\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} = S^2\{c_{b1}\Omega\varepsilon/S^2 - c_{w1}f_w(\frac{\varepsilon}{S^2 d})^2 + \\ + \frac{1}{\sigma}\frac{\partial}{\partial x_i}[\frac{\varepsilon}{S^2}\frac{\partial(\varepsilon/S^2)}{\partial x_i}] + \frac{c_{b2}}{\sigma}\frac{\partial(\varepsilon/S^2)}{\partial x_i}\frac{\partial(\varepsilon/S^2)}{\partial x_i}\} + \\ + \frac{\varepsilon}{S^2}[(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i})\frac{\partial}{\partial x_i}\{-\frac{\partial p^*}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_l}[\frac{\varepsilon}{S^2}(\frac{\partial U_l}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_l})]\} + \\ + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}(\frac{\partial}{\partial x_j}\{-\frac{\partial p^*}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_l}[\frac{\varepsilon}{S^2}(\frac{\partial U_i}{\partial x_l} + \frac{\partial U_l}{\partial x_i})]\} + \\ + \frac{\partial}{\partial x_i}\{-\frac{\partial p^*}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_l}[\frac{\varepsilon}{S^2}(\frac{\partial U_i}{\partial x_l} + \frac{\partial U_l}{\partial x_i})]\})]. \quad (10)$$

Уравнение (10) содержит только вторые частные производные от диссипации ε по пространственным переменным, также в него входят

частные производные по пространственным переменным от модифицированного давления p^*. Его можно определить (как и обычное давление p в уравнениях Навье – Стокса) взятием операции дивергенции от обеих частей уравнения Рейнольдса (6) с учетом уравнения несжимаемости (7) и последующим решением полученного уравнения Пуассона:

$$\frac{\partial^2 p^*}{\partial x_i \partial x_i} = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j}[\nu_t(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i})] - \frac{\partial U_i}{\partial x_j}\frac{\partial U_j}{\partial x_i}. \quad (11)$$

Система уравнений (6), (7), (10) образует систему 5 скалярных уравнений относительно 5 неизвестных функций $U_1, U_2, U_3, p^*, \varepsilon$.

Для сравнения приведем уравнение для переноса диссипации ε [2]:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \alpha S \varepsilon - \beta \frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{\varepsilon}{S^2}\frac{\partial}{\partial x_j}\varepsilon) - \\ -\gamma \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_i}(\frac{\varepsilon^2}{S^5}\frac{\partial^2}{\partial x_j \partial x_j}\varepsilon), \quad (12)$$

где α, β, γ – эмпирические положительные постоянные.

Встает вопрос о систематическом построении уравнения переноса осредненной (крупномасштабной) диссипации и возможном его последовательном улучшении.

Для этого выпишем точное уравнение для переноса диссипации, полученное непосредственно из уравнений Навье – Стокса. Поскольку это уравнение очень громоздко, вывод его не всегда можно найти даже в известных монографиях, к тому же выводы могут отличаться в деталях. Далее будет приведен такой вывод максимально упрощенного уравнения переноса диссипации, как его представляют авторы.

Приближенное уравнения переноса диссипации для анизотропной турбулентности

Следуя [12], удельная скорость диссипации турбулентной энергии определяется как

$$\varepsilon = \frac{1}{2}\nu < (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})^2 > \quad (13)$$

или

$$\varepsilon = \nu < (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})\frac{\partial u_i}{\partial x_j} >. \quad (14)$$

Иногда для замыканий используют уравнение переноса «изотропной диссипации» D:

$$D = \nu < \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} >, \quad (15)$$

при этом полагают, что при больших числах Рейнольдса $\varepsilon \approx D$.

Выпишем уравнение переноса мелкомасштабной скорости [13]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_k \frac{\partial U_i}{\partial x_k} + U_k \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_k}(u_i u_k - < u_i u_k >) = \\ = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_k}. \quad (16)$$

Продифференцируем это уравнение по x_m и учтем, что при таком дифференцировании производные от крупномасштабных переменных можем считать равными нулю, в результате получим соотношение

$$\frac{\partial}{\partial x_m}(\frac{\partial u_i}{\partial t}) + \frac{\partial u_k}{\partial x_m}\frac{\partial U_i}{\partial x_k} + U_k \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_m \partial x_k} + \\ + \frac{\partial^2}{\partial x_m \partial x_k}(u_i u_k) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial^2 p}{\partial x_m \partial x_i} + \nu \frac{\partial^3 u_i}{\partial x_m \partial x_k \partial x_k}. \quad (17)$$

Введем мгновенную удельную скорость диссипации турбулентной энергии:

$$\varepsilon_{ins} = \frac{1}{2}\nu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})^2, \quad (18)$$

соответствующую осредненной скорости диссипации, задаваемой формулой (14): $\varepsilon = < \varepsilon_{ins} >$.

Продифференцируем формулу (18) по времени, поменяем местами дифференцирование по времени и по пространственным переменным и учтем, что вклад в частную производную диссипации по времени смешанных производных $\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial t}$ и $\frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial t}$ одинаков:

$$\frac{\partial \varepsilon_{ins}}{\partial t} = 2\nu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})\frac{\partial}{\partial x_j}\frac{\partial u_i}{\partial t}. \quad (19)$$

Подставляя в это выражение (19) соотношение (17), получим уравнение переноса мгновенной диссипации:

$$\frac{\partial \varepsilon_{ins}}{\partial t} = 2\nu(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})(-\frac{\partial u_k}{\partial x_j}\frac{\partial U_i}{\partial x_k} - U_k \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_k} - \\ -\frac{1}{\rho}\frac{\partial^2 p}{\partial x_j \partial x_i} - \frac{\partial^2 (u_i u_k)}{\partial x_j \partial x_k} + \nu \frac{\partial^3 u_i}{\partial x_j \partial x_k \partial x_k}). \quad (20)$$

Будем считать, что мы используем усреднение по кубической пространственной ячей-

ке с длиной ребра, равной интегральному масштабу турбулентности $L=\varepsilon^{1/2}S^{-3/2}$ и времени $T=1/S$. Если турбулентный поток проносится через ячейку с постоянной внутри ячейки скоростью U, то при переходе в систему координат, двигающуюся с такой скоростью, эту скорость в ней можно считать равной нулю. Понятно, что как мгновенная диссипация, определяемая формулой (18), так и осредненная диссипация, определяемая формулой (13), при этом не изменятся. Усредняя уравнение (20) и возвращаясь затем в исходную (неподвижную) систему координат, окончательно получим уравнение

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}+U_i\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_i}=T_1+T_2+T_3+T_4, \qquad (21)$$

где

$T_1=-2\nu<(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i})\frac{\partial u_k}{\partial x_j}>\frac{\partial U_i}{\partial x_k}$ – порождение диссипации;

$T_2=-\frac{2\nu}{\rho}<(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i})\frac{\partial^2 p}{\partial x_i\partial x_j}>$ – изотропизация давлением;

$T_3=-2\nu<(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i})\frac{\partial^2(u_iu_k)}{\partial x_j\partial x_k}>$ – нелинейный член;

$T_4=2\nu^2<(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i})\frac{\partial^3 u_i}{\partial x_j\partial x_k\partial x_k}>$ – диссипация диссипации.

По мнению авторов, здесь выписана наиболее простая форма уравнения переноса диссипации из всех, предложенных ранее. Отметим, что последний член T_4 может быть записан в более симметричном виде:

$$T_4=\nu^2<(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_j})\frac{\partial^2}{\partial x_k\partial x_k}(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i})>. \qquad (22)$$

Интегрированием по частям последнее выражение можно привести к виду

$$T_4=-\nu^2<[\frac{\partial}{\partial x_k}(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i})]^2>, \qquad (23)$$

показывающему, что T_4 действительно диссипирует диссипацию, то есть переводит вихри с размером порядка масштаба Тейлора в тепло.

Результаты и их обсуждение

Авторами показано, что уравнение переноса диссипации в рамках однопараметрических моделей турбулентности может быть выведено из уравнения переноса турбулентной вязкости с привлечением приближения локального баланса. При этом полученное уравнение имеет очень сложный вид, что умаляет его достоинство. Единственный путь получить более осмысленное уравнение переноса диссипации – это обратиться непосредственно к уравнениям Навье – Стокса, разделить движение на крупномасштабное и мелкомасштабное.

Используя уравнение переноса мелкомасштабной скорости, можно получить уравнение переноса осредненной диссипации, что и было подробно проделано в данной работе. Полученное уравнение переноса диссипации содержит четыре неизвестных члена T_1,T_2,T_3,T_4, имеющих прозрачный физический смысл.

Однако уравнение станет практически полезным, если удастся найти подходящие решения для мелкомасштабных компонент скорости, которые при подстановке их в уравнение (21) осуществят замыкание турбулентности. Возможными кандидатами являются вихри Лундгрена [14–17].

Выводы

В работе рассмотрены два уравнения переноса диссипации турбулентной энергии, одно из них выведено в данной работе исходя из готового уравнения переноса турбулентной вязкости, другое было получено одним из авторов ранее [2]. Представляется, что дальнейший прогресс в построении моделей турбулентности будет связан с нахождением подходящих приближенных решений уравнения переноса мелкомасштабных компонент скорости типа (16).

Библиографический список

1. *Давыдов, В. И.* К статистической динамике несжимаемой турбулентной жидкости. ДАН СССР, 1961. Т. 136. № 1. С. 47–50.
2. *Balonishnikov, A. M.* Extended local balance model of turbulence // Physical review E. 2000. Vol. 61. N 2. P. 1390–1394.
3. *Balonishnikov, A. M.* Turbulent Couette-Taylor flow at very large Taylor numbers // Technical physics. 2016. N 11. P. 1755–1759.
4. *Yakhot, V.* Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. / V. Yakhot, S. A. Orszag // Journal of scientific computations. 1986. Vol. 1. P. 3–50.
5. *Yoshizava, A.* Statistic modeling of a transport equation for kinetic dissipation energy rate // Physics of Fluids. 1987. Vol. 30. N 3. P. 628–631.
6. *Rebollo, T. C.* Derivation of the “k-epsilon” model for locally homogeneous turbulence by homogeneous techniques / T. C. Rebollo., D.F. Coronil // Comptes

Rendus de l'Academie de Sciences. 2003. Ser. I 337. P. 431–436.
7. *Rubenstein, R.* Analytic theory of the destruction terms in dissipation rate transport equation / R. Rubenstein, Y. Zhou // Physics of Fluids. 1996. Vol. 8. N 11. P. 3172–3177.
8. *Gori, F.* A three dimensional exact equation for the turbulent dissipation rate of generalized Newtonian fluids / F. Gori., A. Boghi // International communications in heat and mass transfer. 2012. Vol. 39. P. 477–485.
9. *Hamba, F.* Exact transport equation for local eddy viscosity in turbulent shear flow // Physics of Fluids. 2013. V. 25. P. 085102.
10. *Menter, F. R.* Eddy viscosity transport equation and their relation to the k-e model // Transaction of American society of mechanical engineers: Journal of fluid Engineering. 1997. Vol. 119. P. 876–884.
11. *Nagano, Y.* Renormalization group theory for turbulence: eddy-viscosity type of model based on an iterative averaging method / Y. Nagano, Y. Itazu // Physics of Fluids. 1997. Vol. 9. N 1. P. 143–153.
12. *Frisch, U.* Turbulence: The legacy of A. N. Kolmogorov. Cambridge university press, 1995. 296 p.
13. *Balonishnikov, A. M.* New equation for the polarization Fourier-components of the small-scale velocity for the incompressible fluids in anisotropic turbulence // Technical physics. 2003. Vol. 48. N 10. P. 1255–1257.
14. *Lundgren, T. S.* Strained vortex model for turbulent fine structure // Physics of fluids. 1982. Vol. 25. N 12. P. 2193–2203.
15. *Lundgren, T. S.* A small scale turbulence model // Physics of Fluids. 1993. Vol. A 5. N 6. P. 2193–2203.
16. *Gibbon, J. D.* Dynamically-streched vortices as solutions of 3D Navier-Stokes equations / J. D. Gibbon, A. S. Fokas, C. R. Doering // Physica D. 1999. Vol. 132. P. 497–510.
17. *Cuypers, Y.* Vortex burst as a source of turbulence / Y. Cuypers, A. Maurel, P. Petitjeans // Physical review letters. 2003. Vol. 91. N 19. 194502 p.

УДК 519.87

Л. П. Вершинина
доктор технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
М. И. Вершинин
кандидат педагогических наук
Санкт-Петербургский горный университет

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МНОГОМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Рассмотрены проблемы использования традиционных методов идентификации при исследовании многомерных объектов в условиях неопределенности. На основе теории нечетких множеств и нечеткой логики разработан метод идентификации многомерных объектов. При построении связи между многомерным входом и выходом вместо общепринятого дизъюнктивного используется конъюнктивное правило вывода, что упрощает процедуру вывода и приводит к более компактной и удобной для практического применения модели.

***Ключевые слова**: идентификация, многомерные объекты, неопределенность, нечеткие множества, нечеткая логика.*

L. P. Vershinina
PhD. Tech., Associate Professor
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
M. I. Vershinin
PhD. Pedagogic Saint-Petersburg Mining University

IDENTIFICATION OF MULTIDIMENSIONAL OBJECTS UNDER UNCERTAINTY

The problems of the use of traditional identification methods in the study of multidimensional objects in conditions of uncertainty reviewed. Based on the theory of fuzzy sets and fuzzy logic developed method of identification of multidimensional objects. When you add a link between a multidimensional input and output instead of the commonly used disjunctive rule uses conjunctive inference rule, which simplifies the output and results in a more compact and convenient for the practical application of the model.

***Keywords:** identification, multidimensional objects, vagueness, fuzzy sets, fuzzy logic.*

Идентификация объектов необходима при исследовании их свойств и особенностей с целью последующего управления. Повышение эффективности и качества управления достигается за счет применения теории и методов идентификации, ориентированных на особенности объектов.

Одной из таких особенностей является многомерность объекта.

В общем случае задача идентификации сводится к определению оператора, преобразующего входные воздействия объекта в выходные величины. Оператор является математической моделью объекта и определяется в соответствующих пространствах функций. Операторы могут характеризоваться разными структурой и параметрами, и, соответственно, задача идентификации объекта может иметь различные постановки [1, 2].

Использование классических методов идентификации многомерных объектов вызывает затруднение даже в детерминированных условиях. Так, при описании объекта системой дифференциальных уравнений, с одной стороны, учет всех известных факторов, играющих роль при управлении, приводит к недопустимо громоздкой модели объекта, что практически исключает возможность ее использования при оперативном управлении; с другой стороны, абстрагирование от некоторых параметров объекта и упрощение модели приводит к неадекватности ее объекту.

При традиционном подходе управляемый объект в качестве объекта идентификации рассматривается как элемент, который динамически преобразует некоторый сигнал [3]. Идентификация многих реальных нелинейных объектов начинается с построения статической модели. Объект рассматривается как функциональный преобразователь, то есть предполагается существование функционального соотношения, связывающего вход и выход объекта, $y=F(\mathbf{x})$ – статической характеристики объекта, заранее неизвестной. Основываясь на знании выборок входных векторов $\mathbf{x}_i$, $i=1,2,...,M$ и соответствующих значений выходной переменной y_j, $j=1,2,...,N$, необходимо найти такую аппроксимацию $\tilde{y}=\tilde{F}(\mathbf{x})$ функции $y=F(\mathbf{x})$, чтобы заданный критерий качества аппроксимации принимал экстремальное значение.

Обычно этим критерием является функционал вида

$$J=\int_X\left[y-\tilde{F}(\mathbf{x})\right]^2 p(\mathbf{x})d\mathbf{x}\,, \qquad (1)$$

где X – пространство входных переменных объекта, $p(\mathbf{x})$ – плотность распределения вектора $\mathbf{x}\in X$.

Во многих случаях делаются дополнительные предположения о совместной плотности распределения $p(\mathbf{x},y)$ и виде шума. В этом случае y в формуле (1) заменяется на функцию регрессии $E(y|\mathbf{x})$.

Существует ряд методов решения этой задачи, такие как методы наименьших квадратов и максимального правдоподобия, обычные алгоритмы регрессионного и корреляционного анализа, процедуры стохастической аппроксимации. При использовании этих методов форма аппроксимирующей функции $\tilde{F}(\mathbf{x},\Theta)$ должна выбираться заранее с точностью до вектора неизвестных параметров Θ. Тогда задача сводится к определению оценки $\hat{\Theta}$, минимизирующей функционал (1) по экспериментальным данным (x_i,y_j).

На практике форма функции $F(\mathbf{x})$ часто неизвестна. В этом случае аппроксимирующая функция $\tilde{F}(\mathbf{x},\Theta)$ обычно представляется конечным отрезком разложения по заданной системе функций $\{g_j(x)\}$:

$$\tilde{F}(\mathbf{x},\Theta)=\sum_{j=1}^{n}\Theta_j g_j(\mathbf{x})\,. \qquad (2)$$

Используемые в реальных задачах статистические данные, как правило, задают жесткие ограничения на число оцениваемых параметров вследствие необходимости статистической значимости получаемых результатов. В условиях многомерности объекта и неполноты информации, как правило, не удается получить статистически значимые результаты. Кроме того, объем и время вычислений резко возрастают с увеличением числа оцениваемых параметров модели, что затрудняет оперативную идентификацию.

Из всего сказанного следует, что если даже искомая функция точно представляется разложением (2), но число слагаемых в этом разложении оказывается слишком большим (в силу сложности $F(\mathbf{x})$), то решить задачу идентификации многомерного объекта практически не удается.

В ряде работ предлагаются методы идентификации, основанные на кусочной аппроксимации исходной функции $F(\mathbf{x})$ [4]. Пространство входных переменных объекта X разбивается на определенное число областей B_j, $j=1, 2,...,r$. В каждой из областей B_j искомая характеристика $y=F(\mathbf{x})$ аппроксимируется функцией достаточно простого вида, например, линейной функцией или даже константой. Параметры аппроксимирующих функций оцениваются с помощью одного из известных алгоритмов идентификации.

Методы кусочной аппроксимации обладают рядом достоинств, которые позволяют получать адекватные модели многомерных нелинейных объектов при сравнительно небольшом объеме экспериментальных данных, что важно для работы в условиях неполноты информации. Для этих методов характерны простота реализации и относительно слабая зависимость точности аппроксимации от вида искомой характеристики.

Кроме того, методы кусочной аппроксимации дают возможность при необходимости осуществлять уточнение модели без значительного увеличения числа оцениваемых параметров. Применение методов кусочной аппроксимации позволяет также избежать вычислительных трудностей построения полиномиальных моделей, связанных с плохой обусловленностью матрицы системы нормальных уравнений при использовании метода наименьших квадратов. Быстродействие рекуррентных процедур кусочной аппроксимации малочувствительно к увеличению размерности пространства входных переменных и к усложнению вида искомой характеристики объекта. Наконец, кусочная аппроксимация применима для построения не только статических, но и динамических моделей некоторых классов объектов [3].

Вместе с тем при решении практических задач все отмеченные преимущества методов кусочной аппроксимации существенно проявляются лишь тогда, когда при отсутствии априорной информации о виде функции $F(\mathbf{x})$ удается получить «хорошее» разбиение пространства входных переменных, то есть разбиение на области, в которых искомая характеристика аппроксимируется достаточно простыми функциями.

В условиях неопределенности применяются адаптивные методы, приспособленные для работы в замкнутом контуре управления и основанные на последовательном уточнении оценок параметров, которые при функционировании в случайной среде получаются по искаженным помехами наблюдениям. Эти методы применимы в случае неопределенности (случайности) среды функционирования [5, 6].

Однако не только среда функционирования, но и состояние объекта может быть неопределенным.

В целях адекватного отображения поведения объекта в условиях неопределенности примем точку зрения, в соответствии с которой учитывается изменение внутреннего состояния объекта под воздействием различных факторов [6, 7]. Такой взгляд на идентификацию позволяет унифицировать теоретический подход и обобщения на нелинейные и неавтономные объекты в условиях неопределенности.

Описание динамического объекта в пространстве состояний в общем виде представим следующим образом

$$\mathbf{X}^{k+1}=A\cdot\mathbf{X}^{k}, \qquad (3)$$

где $\mathbf{X}^{k}$ и $\mathbf{X}^{k+1}$ – состояния объекта в моменты t^{k} и t^{k+1}, A – некоторый оператор.

Задача идентификации объекта состоит в отыскании оценки A^{*}, такой, что для $(\mathbf{X}^{k+1})^{*}$, найденного из модели $(\mathbf{X}^{k+1})^{*}=A^{*}\cdot\mathbf{X}^{k}$, выполняется соотношение:

$$M\left\{\rho[\mathbf{X}^{k+1},(\mathbf{X}^{k+1})^{*}\right\}\rightarrow\min_{A^{*}}. \qquad (4)$$

В качестве оператора A возьмем нечеткое отношение R, связывающее вход $\mathbf{X}$ и выход Y объекта. Качество управления объектом определяется адекватностью модели реальному объекту, поэтому построение адекватной модели в условиях неопределенности является одной из основных проблем идентификации.

Эта проблема усложняется, если объект многомерный. Рассмотрим метод идентификации многомерного объекта, позволяющий снизить размерность задачи.

Пусть объект описывается m входными параметрами $\{X_1,...,X_m\}$, каждый из которых может принимать n значений, полученных экспериментально, и одним выходным параметром, и пусть описание объекта дано в виде продукционных правил:

$$\left.\begin{array}{lll}\text{если} & X_{11},...,X_{1j},...,X_{1m}, \text{то} & Y_1, \text{иначе}\\ \ldots & \ldots & \ldots\\ \text{если} & X_{i1},...,X_{ij},...,X_{im}, \text{то} & Y_i, \text{иначе}\\ \ldots & \ldots & \ldots\\ \text{если} & X_{n1},...,X_{nj},...,X_{nm}, \text{то} & Y_n,\end{array}\right\} \qquad (5)$$

где $X_{ij}=\{(u_k,\mu_{X_{ij}}(u_k))\}$ – i-е нормализованное нечеткое значение j-го входного параметра X_j; $u_k\in U_j$; $i=1,...,\ n$; $j=1,...,\ m$; $k=1,...,\ K$; $Y_i=\{(v_l,\mu_{Y_i}(v_l))\}$ – i-е нормализованное нечеткое значение j-го выходного параметра Y; $v_l\in \mathrm{V}$; $l=1,...,\ L$; U_j, V – области изменения X_j и Y соответственно.

Систему (5) формализуем в виде совокупности матриц нечетких отношений $\{R_{ij}\}$, для которых функция принадлежности (ФП) определяется выражением

$$\mu_{R_{ij}}(u_k,v_l)=\Omega(\leftharpoondown_{X_{ij}}(u_k),\leftharpoondown_{Y_i}(v_l)), \qquad (6)$$

где Ω – некоторый оператор нечеткой импликации, связывающий входные и выходной параметры.

Для расчета значений выходного параметра используется композиционное правило вывода, вид которого зависит от типа оператора в (6). В нечетком управлении отношение R_{ij} обычно имеет ФП, определяемую как

$$\mu_{R_{ij}}(u_k,v_l)=\min(\mu_{X_{ij}}(u_k),\mu_{Y_i}(v_l)), \qquad (7)$$

а правило вывода имеет вид

$$Y_t=\bigcup_{i=1}^{n}\bigcap_{j=1}^{m}X_{tj}\circ R_{ij}, \qquad (8)$$

где X_{tj} – значение параметра X_j в t-м измерении $(t=n+1,...)$.

При использовании импликации заранее предполагается, что нечетко специализированное отображение $\{X_j\}\rightarrow Y$ рассматривается как «грубое отображение», обратное к «грубоинъективному», поскольку, когда мы имеем $\{X_{i1},...,\ X_{ij},...,X_{im}\}$, исключается любое другое нечеткое значение, отличное от Y_i. Использование импликации (7) не накладывает заранее никаких ограничений и не мешает парам $(\{X_{ij}\},Y_i)$

и ($\{X_{ij}\}, Y'_i \neq Y_i$) быть представленными в (5), что снижает качество модели в смысле критерия (4).

Кроме того, импликация (7) соответствует прямому произведению $\{X_{ij}\} \times Y_i$, не заключающему в себе идею причинной связи между $\{X_{ij}\}$ и Y_i.

Используя направленную интерпретацию имеющейся гранулярной спецификации, допускающую причинную связь между $\{X_{ij}\}$ и Y_i, определим R_{ij} следующим образом:

$$\mu_{R_{ij}}(u_k, v_l) = \max(1 - \mu_{X_{ij}}(u_k), \mu_{Y_i}(v_l)). \qquad (9)$$

Следует отметить свойство R_{ij}, определенного в (9):

$$\bigcap_{j=1}^{m} X_{tj} \circ R_{ij} \supset Y_t.$$

Это свойство обусловлено частичным перекрытием X_{tj} и $\overline{x}_{tj}$ (дополнения X_{tj}), которое мешает восстановлению исходной информации для низких степеней принадлежности. Однако это не имеет существенного значения, так как при дефаззификации наиболее информативна область максимальных значений ФП:

$$\mu_{Y'_t}(v_l) = \max(0{,}5,\ \mu_{Y_t}(v_l)),$$

где $Y'_t = \bigcap_{j=1}^{m} X_{tj} \circ R_{ij}$.

Глобальное отношение, определенное на семействе $\{R_{ij}\}$, можно получить, полагая

$$R_j = \bigcap_{i=1}^{n} R_{ij}.$$

Тогда общее правило вывода будет выглядеть следующим образом:

$$Y_t = \bigcap_{i=1}^{n} \bigcap_{j=1}^{m} X_{tj} \circ R_{ij} = \bigcap_{j=1}^{m} X_{tj} \circ R_j. \qquad (10)$$

Так как в (10) используется пересечение нечетких множеств R_j, в процессе вывода рассчитывается m матриц нечетких отношений вместо ($n \times m$) матриц при выводе их на основе правила (8), что резко сокращает объем вычислений, упрощает процедуру вывода и приводит к более компактной, а значит и более удобной для практического применения модели.

Отметим, что требование адекватности модели в смысле критерия (4) при этом удовлетворяется.

Библиографический список

1. *Льюинг, Л.* Идентификация систем. Теория пользователя. М.: Наука, 1991. 432 с.
2. *Штейнберг, Ш. Е.* Идентификация в системах управления. М.: Энергоатомиздат, 1987. 80 с.
3. *Дейч, А. М.* Методы идентификации динамических объектов. М.: Наука, 1985. 240 с.
4. *Дорофеюк, Ю. А.* Структурная идентификация сложных объектов управления на базе методов кусочной аппроксимации // Управление большими системами. 2010. № 30. С. 79–88.
5. *Соколов, С. В.* Методы идентификации нечетких и стохастических систем / С. В. Соколов, С. М. Ковалев, П. А. Кучеренко, Ю. А. Смирнов. М.: Физматлит, 2017. 572 с. URL: https://e.lanbook.com/book/104993.
6. *Вершинин, М. И.* Оперативное прогнозирование состояния природно-технических систем / М. И. Вершинин, Л. П. Вершинина // Аспекты оперативного управления в технических системах: сб. науч. тр. по материалам VI Международной заочн. науч.-практич. конф. 1 декабря 2017 г. Саратов: Альтернатива, 2018. С. 7–23.
7. *Вершинина, Л. П.* Управление технологическими процессами в условиях неопределенности. Саарбрюккен: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2012. 289 с.

УДК 519.64(045)

Д. В. Бутенина*
кандидат физико-математических наук, доцент
Л. А. Решетов*
кандидат технических наук, доцент
М. В. Соколовская*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

РЕГРЕССИОННО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ МНОГОМЕРНЫХ ИНТЕГРАЛОВ

В статье рассматривается регрессионный подход к вычислению многомерных интегралов методом статистических испытаний. Интегрируемая функция представляется в виде совокупности функций регрессии. Оценка неизвестных параметров регрессии определяется по методу наименьших квадратов. Критерием оптимальности вычислений является функционал дисперсии ошибки интегрирования. Введение регрессионной зависимости приводит к уменьшению функционала погрешности. Решена задача оптимизации функционала дисперсии по плотности распределения случайных узлов интегрирования. Предложены адаптивные алгоритмы подстройки плотности к оптимальному значению в процессе вычислений.

***Ключевые слова**: многомерные интегралы, функция регрессии, метод наименьших квадратов, статистические испытания, адаптивно-статистические методы.*

D. V. Butenina*
PhD. Phys.-Math., Associate Professor
L. A. Reshetov*
PhD. Tech., Associate Professor
M. V. Sokolovskaya*
Senior Lecturer
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

REGRESSION-STATISTICAL METHOD OF CALCULATING MANY-DIMENSIONAL INTEGRALS

The article presents regression approach to calculations of many-dimensional integrals. Integrable function is represented in a kind of regression functions. The estimate of regression parameters of the function approximation is carried out by a method of the least squares. The criterion of an optimum of functioning of the object is the functional of an error deviation. The introduction of regressive dependence results to the reduction of a dispersion of an integral calculation error. The optimum in sense of a minimum of error functional density p (x) satisfies to some nonlinear integral equation. Also different approaches to adaptation of calculation algorithms during their functioning are considered.

***Keywords:** many-dimensional integrals, regression functions, method of the least squares, random grid of integration, adaptation of calculation algorithms.*

Пусть требуется вычислить n-мерный интеграл на ограниченном замкнутом множестве $D \subset R_n$:

$$J = \int_D f(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = M_\xi \left\{ \frac{f(\xi)}{p(\xi)} \right\}, \qquad (1)$$

где ζ – случайная величина, распределенная с плотностью $p(\mathbf{x})$: $p(\mathbf{x}) > 0$ при всех $\mathbf{x} \in D, \int_D p(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = 1$, $M_\xi\{\cdot\}$ – символ математического ожидания по ζ.

Используем для этого следующий статистический алгоритм:

1. Функция $g(\mathbf{x})$ представляется в виде

$$g(\mathbf{x}) = \frac{f(\mathbf{x})}{p(\mathbf{x})} = \theta^T \psi(\mathbf{x}) + \Delta g(\mathbf{x}), \qquad (2)$$

где $\theta \in R_m$ – неизвестный вектор параметров; $\psi(\mathbf{x}) \in R_m$ – известная вектор-функция, компонентами которой являются линейно-независимые на D базисные функции; $\Delta g(\mathbf{x})$ – минимальный по дисперсии остаток аппроксимации, имеющий нулевое среднее.

Тогда

$$J = \int_D g(\mathbf{x})p(\mathbf{x})d\mathbf{x} = \\ = \theta^T \int_D \psi(\mathbf{x})p(\mathbf{x})d\mathbf{x} + \int_D \Delta g(\mathbf{x})\,p(\mathbf{x})d\mathbf{x}. \quad (3)$$

Значения параметров θ выбираются из условия минимума функционала дисперсии $\Delta g(\mathbf{x})$:

$$\sigma^2_{\Delta g} = M\left\{\Delta g^2\right\} = M\left\{\left(g(\mathbf{x}) - \theta^T\psi(\mathbf{x})\right)^2\right\}. \quad (4)$$

Минимум функционала (4) достигается при $\theta = \theta^*$ таких, что

$$\theta^* = \arg\min_\theta M\left\{\left(g(\mathbf{x}) - \theta^T\psi(\mathbf{x})\right)^2\right\} = \mathbf{F}_\psi^{-1}\mathbf{J}_\psi, \quad (5)$$

где

$$\mathbf{F}_\psi = \int_D \psi(\mathbf{x})\psi^T(\mathbf{x})p(\mathbf{x})d\mathbf{x}; \quad \mathbf{J}_\psi = \int_D f(\mathbf{x})\psi(\mathbf{x})d\mathbf{x}. \quad (6)$$

Если в качестве коэффициентов θ регрессионной модели (2) выбрать $\theta = \theta^*$, определенные формулой (5), то

$$\int_D \Delta g(\mathbf{x})\psi(\mathbf{x})p(\mathbf{x})d\mathbf{x} = \mathbf{0}. \quad (7)$$

Пусть

$$\psi(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 1 \\ \varphi(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \in R_m; \quad \theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vartheta \end{bmatrix} \in R_m. \quad (8)$$

Тогда интеграл (3) преобразуется к виду

$$J = \theta^T \int_D \psi(\mathbf{x})p(\mathbf{x})d\mathbf{x} = \theta_1 + \vartheta^T \int_D \varphi(\mathbf{x})p(\mathbf{x})d\mathbf{x}. \quad (9)$$

2. Оценка параметров θ аппроксимации (2) осуществляется методом наименьших квадратов:

$$\hat\theta_N = \arg\min_{\hat\theta}\left\{\sum_{i=1}^N \left(g(\mathbf{x}_i) - \hat\theta^T\psi(\mathbf{x}_i)\right)^2 + \right. \\ \left. + \left(\hat\theta - \hat\theta(0)\right)^T \mathbf{Q}(0)\left(\hat\theta - \hat\theta(0)\right)\right\},$$

где $\mathbf{x}_i$ – независимые реализации случайной величины ζ, распределенной с плотностью $p(\mathbf{x})$, $\hat\theta(0)$ – априорная оценка неизвестных параметров θ, $\mathbf{Q}(0)$ – априорная дисперсионная матрица оценок $\hat\theta(0)$.

Оценка параметров θ удовлетворяет следующему соотношению:

$$\hat\theta_N = \mathbf{Q}_N\Phi_N\mathbf{G}_N. \quad (10)$$

Здесь Φ_N – матрица размерностью $m \times N$, i-м столбцом которой является вектор $\psi(\mathbf{x}_i)$, $i = 1,\ldots,N$;

$$\mathbf{G}_N = \left[g(\mathbf{x}_1),\ldots,g(\mathbf{x}_N)\right]^T;$$

$$\mathbf{G}_N = \Phi_N^T\theta + \mathbf{V}_N;$$

$$\mathbf{V}_N = \left[V_1,\ldots,V_N\right]^T = \left[\Delta g(\mathbf{x}_1),\ldots,\Delta g(\mathbf{x}_N)\right]^T;$$

$$\mathbf{Q}_N = \mathbf{F}_N^{-1},$$

где

$$\mathbf{F}_N = \Phi_N\Phi_N^T = \sum_{i=1}^N \psi(\mathbf{x}_i)\psi^T(\mathbf{x}_i) -$$

информационная матрица Фишера.

Оценка $\hat\theta_N$ сходится по вероятности к значению параметров θ^*. Дисперсия оценки $\hat\theta_N$:

$$D\left\{\hat\theta_N\right\} = M\left\{\left(\theta - \hat\theta_N\right)\left(\theta - \hat\theta_N\right)^T\right\} = \\ = M\left\{\mathbf{Q}_N\Phi_N\mathbf{V}_N\mathbf{V}_N^T\Phi_N^T\mathbf{Q}_N\right\} - \left(M\left\{\mathbf{Q}_N\Phi_N\mathbf{V}_N\right\}\right)^2.$$

Описанная оценка удовлетворяет следующей системе рекуррентных уравнений:

$$\hat\theta_{N+1} = \hat\theta_N + \\ + \frac{\mathbf{Q}_N\psi(\mathbf{x}_{N+1})\left(g(\mathbf{x}_{N+1}) - \psi^T(\mathbf{x}_{N+1})\hat\theta_N\right)}{1 + \psi^T(\mathbf{x}_{N+1})\mathbf{Q}_N\psi(\mathbf{x}_{N+1})}; \\ \hat\theta_0 = \hat\theta(0);$$

$$\mathbf{Q}_{N+1} = \mathbf{Q}_N - \frac{\mathbf{Q}_N\psi(\mathbf{x}_{N+1})\psi^T(\mathbf{x}_{N+1})\mathbf{Q}_N}{1 + \psi^T(\mathbf{x}_{N+1})\mathbf{Q}_N\psi(\mathbf{x}_{N+1})}; \quad (11) \\ \mathbf{Q}_0 = \mathbf{Q}(0).$$

3. Оценка искомого интеграла (1) дается в виде

$$\hat J_N = \int_D \hat f_N(\mathbf{x})d\mathbf{x} = \hat\theta_N^T\mathbf{h}, \quad (12)$$

где

$$\hat f_N(\mathbf{x}) = p(\mathbf{x})\hat\theta_N^T\psi(\mathbf{x}); \ \mathbf{h} = \int_D \psi(\mathbf{x})p(\mathbf{x})d\mathbf{x}$$

предполагается известным.

Система уравнений (11) рассматривается как стохастический объект управления, уравнение (12) задает выход этого объекта. Управляющим воздействием в этом случае является функция плотности распределения узлов сетки $\mathbf{x}_i$. Критерием оптимальности функционирования объекта (11), (12) является функционал дисперсии ошибки:

$$D_{\hat{J}_N} = \sigma^2_{\Delta g} \mathbf{h}^T D_{\hat{\theta}_N} \mathbf{h}. \quad (13)$$

Нижеследующее утверждение (доказательство приведено в [1]) дает эффективный способ явного представления функционала (13) через управляющую функцию плотности.

Пусть в выражении (8)

$$M\{\varphi(\xi)\} = \int_D \varphi(\mathbf{x}) p(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \mathbf{0};$$

$$\mathbf{F}_\varphi = \int_D \varphi(\mathbf{x}) \varphi^T(\mathbf{x}) p(\mathbf{x}) d\mathbf{x} > \mathbf{0}.$$

Тогда

$$D_{\hat{J}_N}\{p, f\} = \frac{1}{N}\left(\int_D \frac{f^2(\mathbf{x})}{p(\mathbf{x})} d\mathbf{x} - J^2 - \mathbf{J}_\varphi^T \mathbf{F}_\varphi^{-1} \mathbf{J}_\varphi \right), \quad (14)$$

где $\mathbf{J}_\varphi = \int_D f(\mathbf{x}) \varphi(\mathbf{x}) d\mathbf{x}.$

Известно, что при традиционном вычислении интегралов методом Монте-Карло дисперсия погрешности вычислений определяется двумя первыми слагаемыми в (14). Введение регрессионной зависимости $\vartheta^T \varphi(\mathbf{x})$ в (10) приводит, как это видно из (14), к уменьшению дисперсии погрешности вычисления интеграла, но только в тех случаях, когда не все базисные функции $\varphi(\mathbf{x})$ ортогональны функции $f(\mathbf{x})$, так как при этом величина дисперсии та же, что и при традиционном подходе. Отметим также, что функционал качества работы системы определяется не только управляющим воздействием $p(\mathbf{x})$, но и интегрируемой функцией $f(\mathbf{x})$, вносящей фактор неопределенности в процесс управления. Поэтому решение оптимизационной задачи по выбору $p_{opt}(\mathbf{x})$ не приводит к физически реализуемому управлению, так как $p_{opt}(\mathbf{x}) = p_{opt}\{\mathbf{x}, f\}$. Тем не менее получение явного выражения для $p_{opt}\{\mathbf{x}, f\}$ может быть использовано для организации процесса адаптивной подстройки вычислений.

Оптимальная в смысле минимума функционала (14) плотность $p^*(\mathbf{x})$ удовлетворяет следующему нелинейному интегральному уравнению:

$$p^*(\mathbf{x}) = \frac{|f(\mathbf{x})|}{\sqrt{\lambda + \mu^T \varphi(\mathbf{x}) + \left(\varphi^T(\mathbf{x}) \left(\int_D \varphi(\mathbf{y}) \varphi^T(\mathbf{y}) p^*(\mathbf{y}) d\mathbf{y} \right)^{-1} \mathbf{J}_\varphi \right)^2}}, \quad (15)$$

где λ выбирается из условия нормировки, а $\mu \in R_{m-1}$ – из условий $\int_D \varphi(\mathbf{x}) p^*(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \mathbf{0}.$

Полученное уравнение для $p^*(\mathbf{x})$ дает возможность построения стратегии управления, необходимой для синтеза физически реализуемых адаптивных управлений. Для дальнейшего удобно уравнение (15) записать в виде

$$p^*(\mathbf{x}) = \frac{|f(\mathbf{x})|}{\sqrt{\lambda + \mu^T \varphi(\mathbf{x}) + \left(\vartheta^{*T} \varphi(\mathbf{x}) \right)^2}}.$$

Физическая нереализуемость плотности $p^*(\mathbf{x})$ состоит в том, что она существенным образом зависит от функции $f(\mathbf{x})$ и параметров θ^*, также определяемых через значения $f(\mathbf{x})$.

Стратегия адаптивного управления процессом вычисления будет состоять в том, что на основе предыдущих k серий вычислений интегрируемой функции $f(\mathbf{x})$ в отдельных точках строится ее аппроксимация $\hat{f}_k(\mathbf{x})$ во всей области D, даются оценки $\hat{\theta}_k$ и $\hat{J}_k$ значениям параметров θ^* и J в соответствии с алгоритмом (11), (12). Плотность генерирования узлов сетки в следующей $k+1$ серии вычислений выбирается в соответствии с (15) по формуле

$$p_{k+1}(\mathbf{x}) = \frac{\left|\hat{f}_k(\mathbf{x})\right|}{\sqrt{\lambda + \mu^T \varphi(\mathbf{x}) + \left(\hat{\vartheta}_k^T \varphi(\mathbf{x}) \right)^2}}. \quad (16)$$

Различие алгоритмов адаптивного управления в изложенной постановке определяется различием способов аппроксимации функции $f(\mathbf{x})$. Ниже рассмотрим два способа аппроксимации $f(\mathbf{x})$ в кусочно-постоянном виде и на основе регрессионной модели (2).

Воспользуемся аппроксимацией (2) для функции $f(\mathbf{x})$. Тогда в результате первых k серий вычислений будем иметь следующую оценку:

$$\hat{f}_k(\mathbf{x}) = p(\mathbf{x}) \hat{\theta}_k^T \psi(\mathbf{x}). \quad (17)$$

Подстановка (17) в (16) дает следующее рекуррентное уравнение для плотности генерации $k+1$-й серии точек сетки:

$$p_{k+1}(\mathbf{x}) = \frac{\left|\hat{\vartheta}_k^T \psi(\mathbf{x})\right|}{\sqrt{\lambda + \mu^T \varphi(\mathbf{x}) + \left(\hat{\vartheta}_k^T \varphi(\mathbf{x})\right)^2}} p_k(\mathbf{x}).$$

Данный подход основан на параметрической гипотезе аппроксимации. Он оказывается эффективным, если исходная аппроксимация (2) функции $f(\mathbf{x})$ достаточно точна и соответствует существенным ее изменениям, которые необходимо отразить в плотности $p(\mathbf{x})$. В противном случае следует применять непараметрические способы аппроксимации, подобные описанным в работе [2].

В заключение следует отметить, что изложенные подходы распространяются на более сложные объекты вычислительной математики, такие как адаптивные алгоритмы численного решения интегральных уравнений, а также краевых задач математической физики.

Библиографический список

1. *Бутенина, Д. В.* Адаптивно-статистические методы в задачах вычислительной механики. СПб.: ВВМ, 2011. 128 с.
2. *Иванов, В. М.* Статистические методы численного анализа с адаптацией: В. М. Иванов, О. Ю. Кульчицкий. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1994. 120 с.

УДК 519.612.4

Д. В. Бутенина*
кандидат физико-математических наук, доцент
Л. А. Решетов*
кандидат технических наук, доцент
М. В. Соколовская*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОСОБЕННОСТИ ЗАКОНА РЕВЕРСИВНОГО ПСЕВДООБРАЩЕНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВЕДЕНИЯ МАТРИЦ ОДНОГО РАНГА

Исследование псевдоинверсии произведения нескольких матриц составляет основное содержание настоящей работы. Предположение о равенстве рангов матриц, которые образуют произведение, позволило определить условия применения закона реверсивного псевдообращения (reverse order law). С помощью декомпозиции по сингулярным числам для произведения двух матриц доказана взаимосвязь подпространства строк первого сомножителя и подпространства столбцов второго матричного сомножителя.

***Ключевые слова**: закон реверсивного псевдообращения, ранг матрицы, декомпозиция по сингулярным числам.*

D. V. Butenina*
PhD. Phys.-Math., Associate Professor
L. A. Reshetov*
PhD. Tech., Associate Professor
M. V. Sokolovskaya*
Senior Lecturer
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

FEATURES OF THE REVERSE ORDER LAW FOR THE PRODUCT OF MATRICES OF THE SAME RANK

Investigating the pseudo-inversion of the product of several matrices constitutes the main content of this paper. The assumption of equality of the ranks of the matrices that form the product made it possible to determine the conditions for applying the reverse order law. Using decomposition with respect to singular numbers, for the product of two matrices, we found the relationship between the subspace of the rows of the first factor and the subspace of columns of the second matrix factor.

***Keywords:** reverse order law, rank of the matrix, singular value decomposition.*

Введение. Вычисление обобщенной обратной матрицы Мура – Пенроуза, которую часто называют псевдообратной матрицей, является необходимой процедурой при решении многих задач многомерной регрессии и других технических приложений, связанных с обработкой сигналов [1]. Часто матрица, подлежащая псевдообращению, представляет собой произведение двух или более матричных сомножителей.

Условия, обеспечивающие равенство псевдообратной матрицы и произведения псевдообратных матриц отдельных сомножителей, взятых в инверсном порядке следования, называют законом реверсивного псевдообращения (*reverse order law*) [2]. Если условия реверсивного псевдообращения произведения двух матриц даны в работе [3], то для большего числа сомножителей простые и эффективные методы определения границ применения закона неизвестны до сих пор.

В настоящей статье мы приводим результаты исследования закона реверсивного псевдообращения для произвольного числа матричных сомножителей. Основное допущение, которое мы используем, состоит в том, что все матрицы, включая исходную, имеют один и тот же ранг.

Предварительные сведения. Вначале напомним определение обобщенной обратной матрицы Мура – Пенроуза. Пусть матрица $\mathbf{C} \neq \mathbf{0}$ содержит вещественные элементы и $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{m \times n}$. Любую матрицу $\mathbf{C}^{\wedge}$, которая удовлетворяет условию

$$\mathbf{C}\mathbf{C}^{\wedge}\mathbf{C} = \mathbf{C}, \quad (1)$$

называют обобщенной обратной матрицей. Матрица $\mathbf{C}^{\wedge}$ не имеет единственного представления. Если матрица $\mathbf{C}^{\wedge}$ удовлетворяет трем дополнительным условиям

$$\mathbf{C}^{\wedge}\mathbf{C}\mathbf{C}^{\wedge} = \mathbf{C}^{\wedge}, (\mathbf{C}^{\wedge}\mathbf{C})^{\mathrm{T}} = \mathbf{C}^{\wedge}\mathbf{C}, (\mathbf{C}\mathbf{C}^{\wedge})^{\mathrm{T}} = \mathbf{C}\mathbf{C}^{\wedge}, \quad (2)$$

где $(*)^{\mathrm{T}}$ – транспонированная матрица, то матрицу $\mathbf{C}^{\wedge}$ принято обозначать $\mathbf{C}^{+}$ и называть псевдообратной матрицей, или обобщенной обратной матрицей Мура – Пенроуза. Эта матрица определяет единственное решение задачи на минимум $\min_{\mathbf{x}} \|\mathbf{y} - \mathbf{C}\mathbf{x}\|^2$.

Одним из наиболее эффективных методов вычисления псевдообратной матрицы является метод, использующий декомпозицию матрицы по сингулярным числам [4]. Подобная декомпозиция в литературе имеет устойчивое обозначение SVD. Известно, что любая вещественнозначная матрица $\mathbf{C}$ размера $m \times n$ и ранга r может быть представлена в следующем виде:

$$\mathbf{C} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^{\mathrm{T}}, \quad (3)$$

где матрица $\mathbf{U}$ (размер $m \times r$) заполнена столбцами, каждый из которых принадлежит собственным векторам матрицы $\mathbf{C}\mathbf{C}^{\mathrm{T}}$ при ненулевом собственном числе, столбцы матрицы $\mathbf{V}$ (размер $r \times n$) состоят из собственных векторов матрицы $\mathbf{C}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}$, а элементы диагональной матрицы $\mathbf{\Sigma}$ (размер $r \times r$) – это квадратные корни из собственных чисел матрицы $\mathbf{C}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}$ или матрицы $\mathbf{C}\mathbf{C}^{\mathrm{T}}$. Эти числа принято называть сингулярными. Так как матрицы $\mathbf{C}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}$ и $\mathbf{C}\mathbf{C}^{\mathrm{T}}$ являются симметричными, то их собственные векторы ортонормированы и, следовательно, матрицы $\mathbf{U}^{\mathrm{T}}\mathbf{U}$ и $\mathbf{V}^{\mathrm{T}}\mathbf{V}$ равны единичной матрице $\mathbf{I}_r$ (размер $r \times r$). Из декомпозиции матрицы (3) непосредственно следует представление для транспонированной матрицы

$$\mathbf{C}^{\mathrm{T}} = \mathbf{V}\mathbf{\Sigma}\mathbf{U}^{\mathrm{T}} \quad (4)$$

и для обобщенной обратной матрицы Мура – Пенроуза (псевдообратная матрица)

$$\mathbf{C}^{+} = \mathbf{V}\mathbf{\Sigma}^{-1}\mathbf{U}^{\mathrm{T}}. \quad (5)$$

Декомпозиции (4) и (5) мы используем в дальнейшем для определения псевдообратных матриц у матриц, которые содержат произведение двух матричных сомножителей $\mathbf{C} = \mathbf{A}\mathbf{B}$, и затем обобщим его на большее число матричных произведений $\mathbf{C} = \mathbf{A}_1\mathbf{A}_2 \ldots \mathbf{A}_p$.

Основной результат. Пусть матрица $\mathbf{C}$ представляет собой произведение матриц $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$. Если эти матрицы невырожденные, то обратная матрица равна $\mathbf{B}^{-1}\mathbf{A}^{-1}$. При вычислении псевдообратной матрицы $\mathbf{C}^{+}$ эта инверсия не очевидна. Во многих случаях псевдообратная матрица $\mathbf{C}^{+}$ не равна $\mathbf{B}^{+}\mathbf{A}^{+}$. Для произвольных матриц $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$ необходимые и достаточные условия выполнения равенства $\mathbf{C}^{+} = \mathbf{B}^{+}\mathbf{A}^{+}$ (*reverse order law*) сформулированы в работе [3] и неоднократно обновлялись [2], [5].

К сожалению, практическое использование этих правил крайне затруднительно. Чтобы получить правила применения закона реверсивного псевдообращения в простой и явной форме, мы ограничимся рассмотрением матриц $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$ одного ранга r. Если дополнительно потребовать сохранения ранга у произведения матриц, то есть ранг матрицы $\mathbf{C} = \mathbf{A}\mathbf{B}$ также должен быть равен r, то можно получить выражение для псевдообратной матрицы $\mathbf{C}^{+}$ в явном виде.

Лемма. Пусть $\mathbf{A} = \mathbf{U}_\mathbf{A}\mathbf{\Sigma}_\mathbf{A}\mathbf{V}_\mathbf{A}^{\mathrm{T}}$ и $\mathbf{B} = \mathbf{U}_\mathbf{B}\mathbf{\Sigma}_\mathbf{B}\mathbf{V}_\mathbf{B}^{\mathrm{T}}$ декомпозиции матриц $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$ по сингулярным числам. Если матрицы $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$ имеют один и тот же ранг r, то матрица $\mathbf{C} = \mathbf{A}\mathbf{B}$ будет иметь ранг r в том и только в том случае, если подпространства столбцов матриц $\mathbf{V}_\mathbf{A}$ и $\mathbf{U}_\mathbf{B}$ совпадают.

Доказательство. Обозначим через $R(\mathbf{V}_\mathbf{A})$ и $R(\mathbf{U}_\mathbf{B})$ подпространства столбцов матриц $\mathbf{V}_\mathbf{A}$ и $\mathbf{U}_\mathbf{B}$ соответственно. Если $\mathrm{R}(\mathbf{V}_\mathbf{A}) = \mathrm{R}(\mathbf{U}_\mathbf{B})$, то системы векторов, образованные из столбцов матриц $\mathbf{V}_\mathbf{A}$ и $\mathbf{U}_\mathbf{B}$, являются эквивалентными, то есть любой вектор одной системы может быть представлен в виде линейной комбинации векторов другой системы.

Так как матрицы $\mathbf{V}_\mathbf{A}$ и $\mathbf{U}_\mathbf{B}$ – это матрицы полного ранга и имеют ранг r, то матрица преобразования системы векторов должна иметь ранг r и, следовательно, она является невырожденной матрицей. Учитывая, что столбцы матриц $\mathbf{V}_\mathbf{A}$ и $\mathbf{U}_\mathbf{B}$ ортонормированны, из этого результата мы заключаем, что матрица $\mathbf{D} = \mathbf{V}_\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{U}_\mathbf{B}$ тоже должна быть невырожденной. Тогда произведение матриц $\mathbf{C} = \mathbf{A}\mathbf{B}$ можно представить в следующем виде:

$$\mathbf{C} = \mathbf{U}_\mathbf{A}\mathbf{\Sigma}_\mathbf{A}\mathbf{D}\mathbf{\Sigma}_\mathbf{B}\mathbf{V}_\mathbf{B}^{\mathrm{T}}, \quad (6)$$

где все матричные сомножители имеют полный ранг. В соответствии с результатами теоремы о ранговой факторизации матриц [3], [6], каждая матрица размера $m \times n$ и ранга r равна произведению двух матриц полного ранга, причем размеры первого сомножителя $m \times r$, а второго – $r \times n$. Так как по построению SVD матрицы $\mathbf{U}_\mathbf{A}$ и $\mathbf{V}_\mathbf{B}$ – матрицы полного ранга, а матрица $\mathbf{\Sigma}_\mathbf{A}\mathbf{D}\mathbf{\Sigma}_\mathbf{B}$ – это квадратная невырожденная матрица, то, как следует из [6], ранг матрицы $\mathbf{C}$ равен r.

С другой стороны, если ранг матрицы $\mathbf{C}=\mathbf{AB}$ равен r, то ранг матрицы $\mathbf{D}$ не может быть меньше r, так как ранг остальных матриц равен r, а ранг произведения матриц определен матрицей с наименьшим рангом. В связи с тем, что размер матрицы $\mathbf{D}=\mathbf{V_A}^{\mathrm{T}}\mathbf{U_B}$ равен $r\times r$, матрица $\mathbf{D}$ должна быть невырожденной матрицей, что возможно только в том случае, если подпространства столбцов матриц $\mathbf{V_A}$ и $\mathbf{U_B}$ совпадают, то есть $\mathrm{R}(\mathbf{V_A})=\mathrm{R}(\mathbf{U_B})$, и этот вывод завершает доказательство.

Как следует из доказательства леммы, если ранги матриц $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ и $\mathbf{C}$ одинаковы, то матрица $\mathbf{C}$ определена выражением (6), а псевдообратная матрица $\mathbf{C}^{+}$ будет иметь вид

$$\mathbf{C}^{+}=\mathbf{V_B}\mathbf{\Sigma_B}^{-1}\mathbf{D}^{-1}\mathbf{\Sigma_A}^{-1}\mathbf{U_A}^{\mathrm{T}}. \qquad (7)$$

Формула (7) позволяет сравнить в рамках принятой матричной модели псевдообратную матрицу $\mathbf{C}^{+}$ и произведение матриц $\mathbf{B}^{+}\mathbf{A}^{+}$.

Теорема. Пусть $\mathbf{C}=\mathbf{AB}$ и ранг матриц $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ одинаков и равен r. Если декомпозиции матриц $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$ по сингулярным числам соответственно равны $\mathbf{A}=\mathbf{U_A}\mathbf{\Sigma_A}\mathbf{V_A}^{\mathrm{T}}$, $\mathbf{B}=\mathbf{U_B}\mathbf{\Sigma_B}\mathbf{V_B}^{\mathrm{T}}$, то закон реверсивного псевдообращения (*reverse order law*) $\mathbf{C}^{+}=\mathbf{B}^{+}\mathbf{A}^{+}$ применим только в том случае, если матрица $\mathbf{D}=\mathbf{V_A}^{\mathrm{T}}\mathbf{U_B}$ является ортогональной (унитарной для комплексных матриц).

Доказательство. Следуя формуле (5), псевдообратные матрицы $\mathbf{A}^{+}$ и $\mathbf{B}^{+}$ запишем с помощью выражений

$$\mathbf{A}^{+}=\mathbf{V_A}\mathbf{\Sigma_A}^{-1}\mathbf{U_A}^{\mathrm{T}},\ \mathbf{B}^{+}=\mathbf{V_B}\mathbf{\Sigma_B}^{-1}\mathbf{U_B}^{\mathrm{T}}. \qquad (8)$$

Тогда произведение матриц $\mathbf{B}^{+}\mathbf{A}^{+}$ равно $\mathbf{V_B}\mathbf{\Sigma_B}^{-1}\mathbf{U_B}^{\mathrm{T}}\mathbf{V_A}\mathbf{\Sigma_A}^{-1}\mathbf{U_A}^{\mathrm{T}}$ или

$$\mathbf{B}^{+}\mathbf{A}^{+}=\mathbf{V_B}\mathbf{\Sigma_B}^{-1}\mathbf{D}^{\mathrm{T}}\mathbf{\Sigma_A}^{-1}\mathbf{U_A}^{\mathrm{T}}. \qquad (9)$$

Сравнив формулы (7) и (9), нетрудно заметить, что для выполнения равенства $\mathbf{C}^{+}=\mathbf{B}^{+}\mathbf{A}^{+}$ достаточно потребовать, чтобы матрица $\mathbf{D}=\mathbf{V_A}^{\mathrm{T}}\mathbf{U_B}$ обладала следующим свойством:

$$\mathbf{D}^{-1}=\mathbf{D}^{\mathrm{T}}. \qquad (10)$$

Учитывая единственность представления матриц $\mathbf{D}^{-1}$ и $\mathbf{D}^{\mathrm{T}}$, формула (10) должна соответствовать определению ортогональной матрицы. Необходимо также указать, что условие (10) обеспечивает симметрию матриц $\mathbf{A}^{+}\mathbf{ABB}^{\mathrm{T}}$ и $\mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{ABB}^{+}$, что также является признаком применимости *reverse order law* [7].

Нужно отметить, что ортогональные матрицы содержат различные и хорошо известные классы матриц. Так, например, матрицы перестановок принадлежат ортогональным матрицам. В этом случае из утверждения теоремы следует, что для любых двух матриц $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$ одного ранга, у которых столбцы матриц $\mathbf{V_A}$ и $\mathbf{U_B}$ образованы путем взаимных перестановок, справедливо равенство $\mathbf{C}^{+}=\mathbf{B}^{+}\mathbf{A}^{+}$, если произведение $\mathbf{AB}$ существует.

Обобщение. Для принятых предположений возможно доказательство более общего результата. Пусть матрица $\mathbf{C}$ представляет собой произведение матриц одного ранга $\mathbf{C}=\mathbf{A}_1\mathbf{A}_2\ldots\mathbf{A}_p$, $p\geq 2$. Применяя **SVD**, произведение матриц $\mathbf{A}_k\mathbf{A}_{k+1}$, $1\geq k\geq p-1$, запишем в следующем виде:

$$\mathbf{A}_k\mathbf{A}_{k+1}=\mathbf{U}_k\mathbf{\Sigma}_k\mathbf{D}_{k,k+1}\,\mathbf{\Sigma}_{k+1}\mathbf{V}_{k+1}{}^{\mathrm{T}}, \qquad (11)$$

где $\mathbf{D}_{k,k+1}=\mathbf{V}_k{}^{\mathrm{T}}\mathbf{U}_{k+1}$. Согласно утверждению леммы, предположение о равенстве рангов всех матриц, включая матрицу $\mathbf{C}$, требует сохранения невырожденности матриц $\mathbf{D}_{k,k+1}$, $1\geq k\geq p-1$. Тогда из доказанной теоремы мы получаем условие применения закона реверсивного псевдообращения для произведения любого числа матриц. Оно состоит в том, что все матрицы $\mathbf{D}_{k,k+1}$ должны быть ортогональными.

Как нетрудно заметить, для построения матриц $\mathbf{D}_{k,k+1}$ необходимо находить собственные векторы матриц $\mathbf{A}_k{}^{\mathrm{T}}\mathbf{A}_k$ и $\mathbf{A}_{k+1}\mathbf{A}^{\mathrm{T}}{}_{k+1}$ или вычислять ранги матриц, что усложняет их идентификацию. Было бы интересно сократить множество анализируемых матриц для того, чтобы в пределах этого множества ввести простые правила применения закона реверсивного псевдообращения.

Условно-сопряженные матрицы (УСМ). Любые две матрицы одного ранга $\mathbf{A}=\mathbf{U_A}\mathbf{\Sigma_A}\mathbf{V_A}^{\mathrm{T}}$ и $\mathbf{B}=\mathbf{U_B}\mathbf{\Sigma_B}\mathbf{V_B}^{\mathrm{T}}$, произведение которых $\mathbf{AB}$ определено, мы называем условно-сопряженными, если подпространства строк первого сомножителя $\mathbf{A}$ и подпространство столбцов второго сомножителя $\mathbf{B}$ совпадают поэлементно, то есть $\mathbf{V_A}=\mathbf{U_B}$. Условно-сопряженные матрицы имеют ряд интересных свойств:

1. Если число обусловленности матрицы определено как отношение наибольшего сингулярного числа к наименьшему сингулярному числу, то число обусловленности произведения условно-сопряженных матриц равно произведению чисел обусловленности матричных сомножителей. Действительно, из выражения (11), полагая $\mathbf{V}_k=\mathbf{U}_{k+1}$ или, что то же самое, $\mathbf{D}_{k,k+1}=\mathbf{I}_r$, где $\mathbf{I}_r$ – это единичная матрица размера $r\times r$, мы получим для произведения условно-сопряженных матриц следующий результат:

$$\mathbf{A}_k\mathbf{A}_{k+1}=\mathbf{U}_k\mathbf{\Sigma}_k\mathbf{\Sigma}_{k+1}\mathbf{V}_{k+1}{}^{\mathrm{T}},\ 1\geq k\geq p-1.$$

Тогда произведение УСМ $\mathbf{C}=\mathbf{A}_1\mathbf{A}_2\ldots\mathbf{A}_p$ может быть записано в таком виде: $\mathbf{C}=\mathbf{U}_1\mathbf{\Sigma}_1\mathbf{\Sigma}_2\ldots\mathbf{\Sigma}_p\mathbf{V}_p$.

Так как произведение диагональных матриц $\mathbf{\Sigma}_1\mathbf{\Sigma}_2\ldots\mathbf{\Sigma}_p$ – также диагональная матрица, а син-

гулярные числа по определению положительные, то очевидно, что число обусловленности произведения УСМ не может быть меньше числа обусловленности отдельного сомножителя и, как правило, возрастает при увеличении числа сомножителей *p*.

2. Если $\mathbf{C} = \mathbf{AB}$ и матрицы **A, B** принадлежат УСМ, то матрицы $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ и $\mathbf{BB}^T$ перестановочны, а матрица $\mathbf{A}^T\mathbf{ABB}^T$ будет симметричной матрицей. Транспонированные матрицы $\mathbf{A}^T$, $\mathbf{B}^T$ имеют **SVD** $\mathbf{A}^T = \mathbf{V_A}\mathbf{\Sigma_A}\mathbf{U_A}^T$, $\mathbf{B}^T = \mathbf{V_B}\mathbf{\Sigma_B}\mathbf{U_B}^T$ и, соответственно,

$$\mathbf{A}^T\mathbf{A} = \mathbf{V_A}\mathbf{\Sigma_A}^2\mathbf{V_A}^T,\ \mathbf{BB}^T = \mathbf{U_B}\mathbf{\Sigma_B}^2\mathbf{U_B}^T. \qquad (12)$$

Учитывая, что для УСМ справедливо равенство $\mathbf{V}_{\mathbf{A}} = \mathbf{U_B}$, а матрицы $\mathbf{\Sigma_A}^2$ и $\mathbf{\Sigma_B}^2$ диагональные, то перестановочность матриц $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ и $\mathbf{BB}^T$ видна из записи произведений $\mathbf{A}^T\mathbf{ABB}^T$, $\mathbf{BB}^T\mathbf{A}^T\mathbf{A}$, и, кроме того, $\mathbf{C}^+ = \mathbf{B}^+\mathbf{A}^+$.

Заключение. Как показывают результаты работы, проверка применимости закона реверсивного псевдообращения значительно упрощается, если множество матриц, которые подвергаются исследованию, ограничено. Предположение о равенстве рангов матриц, образующих произведение, требует для контроля равенства $\mathbf{C}^+ = \mathbf{B}^+\mathbf{A}^+$ вычисления лишь транспонированных матриц (12), а вычисление собственных векторов и псевдообратных матриц не требуется. Отметим также, что естественным обобщением полученных выводов является их распространение на комплексный случай.

Библиографический список

1. *Гулевитский, А. Ю.* Адаптивная оценка параметров мультипликативной модели в сингулярном случае / А. Ю. Гулевитский, Л. А. Решетов, М. В. Соколовская // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем. СПб.: ГУАП, 2017. С. 201–207.
2. *Алберт, А.* Регрессия, псевдоинверсия и рекуррентное оценивание. Москва.: Наука, 1977. 223 с.
3. *Ben-Israel, A.* Generalized inverses (Theory and applications) / A. Ben-Israel, T. N. E. Greville. Second edition. N.Y.: Springer, 2003. 420 c.
4. *Hartwig, R. E.* Singular value decomposition and the Moore-Penrose inverse of bordered matrices. SIAM J. Appl. Math. 1976. Vol. 31. N 1. P. 31–41.
5. *Tian, Y.* Reverse order laws for the generalized inverses of multiple matrix products. Linear Algebra and its Appl. 1994. Vol. 211. P. 85–100.
6. *Воеводин, В. В.* Матрицы и вычисления / В. В. Воеводин, Ю. А. Кузнецов. М.: Наука, 1984. С. 46–47.
7. *Hartwig, R. E.* Block generalized inverses. Arch. Rat. Mech. Anal. 1976. Vol. 61. P. 35–47.

УДК 681.3.01

С. Л. Козенко
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СОГЛАСОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ НА РАЗРАБОТКУ БОРТОВОЙ ЦИФРОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

В статье приведены методы и модели использования информационных технологий при проектировании бортовой цифровой вычислительной машины на этапе согласования технического задания.

***Ключевые слова**: модель, процесс проектирования бортовой цифровой вычислительной машины, оценка реализуемости технического задания.*

S. L. Kozenko
PhD. Tech., Associate Professor
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

THE USE OF INFORMATION TECHNOLOGY IN AGREEING TECHNICAL SPECIFICATIONS FOR THE DEVELOPMENT OF THE ONBOARD DIGITAL COMPUTER

The article presents methods and models the use of information technology in the design of on-Board digital computing machine tires on the stage.

***Keywords:** model, the process of designing on-Board digital computing machine tires, evaluate the feasibility of technical specifications.*

1. Назначение и основные характеристики БЦВМ

Бортовая цифровая вычислительная машина (БЦВМ) предназначена для сбора, хранения и обработки цифровой информации, управления системами и комплексами и ориентируется на применение в перспективных бортовых вычислительных системах и комплексах.

Из всего многообразия структурных схем БЦВМ для рассмотрения общих вопросов проектирования выберем весьма распространенную структурную схему (рис. 1).

На рис. 1 введены следующие обозначения: УВВ – устройство ввода/вывода информации; ОЗУ – оперативное запоминающее устройство; АЛУ – арифметико-логическое устройство; ПЗУ – постоянное запоминающее устройство; УУ – устройство управления.

Устройство ввода/вывода информации служит для связи вычислительной машины с объектом управления. Оно выполняет главную функцию преобразования входной информации из аналоговой формы в цифровую и выходной информации из цифровой формы в аналоговую.

Оперативное запоминающее устройство – часть памяти БЦВМ, которая в процессе переработки информации непосредственно взаимодействует с АЛУ. Оперативное запоминающее устройство служит для записи и считывания динамической информации об объекте управления. Оно предназначено главным образом для хранения информации, поступающей от датчи-

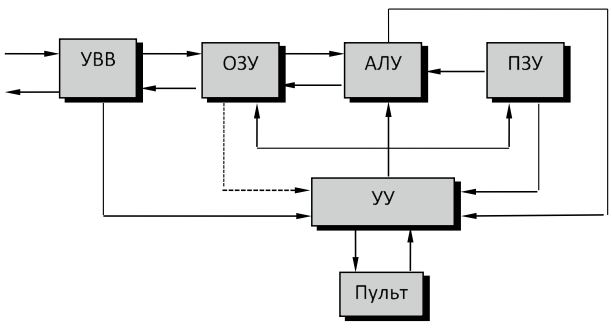


Рис. 1

ков, а также промежуточных и конечных результатов вычислений.

Постоянное запоминающее устройство – специфическая часть оперативной памяти БЦВМ. Особенность ПЗУ состоит в том, что информация записывается в него на заводском стенде (осуществляется так называемая прошивка ПЗУ) и не подлежит изменению в условиях эксплуатации. К такой информации относятся все программы работы БЦВМ, используемые константы при реализации алгоритмов. Таким образом, в процессе функционирования БЦВМ из ПЗУ информация может лишь считываться. Поэтому часто ПЗУ называют односторонней памятью. Конструктивно ПЗУ проще ОЗУ, и стоимость, приходящаяся на единицу хранимой информации для ПЗУ, значительно ниже, чем для ОЗУ.

Арифметико-логическое устройство предназначено для выполнения арифметических и логических операций над числами, представленными с фиксированной или плавающей точкой (запятой).

Устройство управления предназначено для управления блоками, входящими в БЦВМ, по программам, хранящимся в ПЗУ.

Высокая сложность проектируемых БЦВМ приводит к необходимости их рассмотрения как структурного образования, состоящего из нескольких уровней, т. е. классификации БЦВМ по конструктивным признакам. В соответствии с иерархическим представлением сложных объектов проектирования (ОП) составим функционально-логическую схему БЦВМ с учетом деления на уровни и специализацией существующих проектных подразделений (на примере одного из опытно-конструкторских бюро (ОКБ) Санкт-Петербурга) (рис. 2).

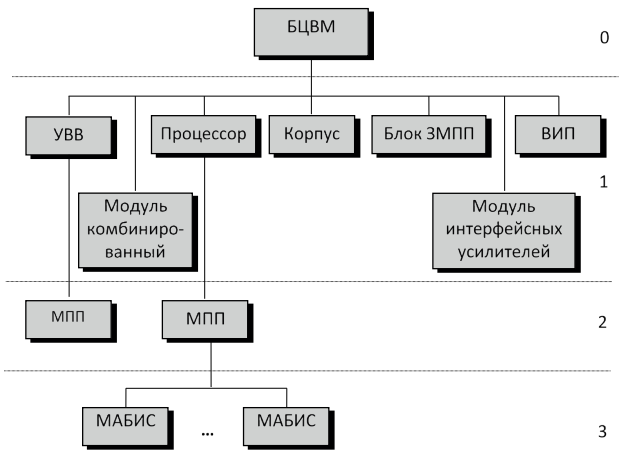


Рис. 2

Из рис. 2 следует, что составляющими первого структурного уровня (составными элементами проектирования) являются УВВ, процессор, модуль комбинированный, модуль интерфейсных усилителей, корпус, вторичный источник питания (ВИП), блок запрограммированных микросхем постоянной памяти (ЗМПП); составляющими второго структурного уровня являются многослойные печатные платы (МПП) и т. п.; составляющими третьего структурного уровня являются матричные БИС (МАБИС).

Основными параметрами, характеризующими технический уровень БЦВМ, являются следующие технические характеристики.

1. Собственно БЦВМ:

– тип процессора;

– число каналов УВВ;

– тип, вид и режим обмена информацией в УВВ;

– тип управления в УУ;

– тип интерфейса;

– тип используемой элементной базы.

2. Устройства БЦВМ:

– ОЗУ, ПЗУ: емкость, структура, быстродействие, разрядность ячейки;

– АЛУ: состав и время выполнения операций, форма представления чисел, точность выполнения операций, длина разрядной сетки, структура АЛУ;

– УУ: состав команд управления, формат команд, структура УУ, время выполнения команд управления;

– УВВ: точность представления исходной информации, структура аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей, организации обмена.

3. Техническое обслуживание:

– среднее время обслуживания запросов на обмен информацией;

– вероятность обслуживания требования на обмен;

– вероятность нахождения каналов системы обмена УВВ в одном из рабочих состояний.

4. Программное обеспечение:

– тип операционной системы и язык программирования;

– количество сервисных и стандартных подпрограмм;

– объем памяти, необходимый для хранения программ.

5. Условия эксплуатации:

– параметры среды и первичной сети энергопитания;

– время непрерывной работы;

– технический ресурс;

– параметры обдува или микроклимата;

– время готовности к работе.

6. Конструкция:

– массогабаритные характеристики;

– тип конструкции и энергопотребление;

– коэффициенты технологичности, унификации и стандартизации;

– ремонтопригодность, стоимость и экономическая эффективность.

Для ориентировочной оценки БЦВМ и сравнения различных ее реализаций используют следующие технические характеристики: быстродействие; емкость и структура памяти; длина разрядной сетки мантиссы исходя из точности реализации алгоритмов; количество входных и выходных каналов УВВ, их быстродействие; масса; габариты; энергопотребление; стоимость; надежность. Требуемые технические характеристики указываются в техническом задании (ТЗ).

2. Оценка реализуемости ТЗ на проектирование БЦВМ

2.1. Формализованное представление ТЗ на проектирование БЦВМ

На основании приведенного описания и методов, описанных в работах [1–3], было осуществлено формализованное представление ТЗ на проектирование БЦВМ, проводившееся в ОКБ. В соответствии с ТЗ комплексная модель может быть представлена следующим образом:

$$S_{\text{М_ТЗ}} = < S_{\text{ТЗ_ТХ}}, S_{\text{ТЗ_ТО}}, S_{\text{ТЗ_ПО}}, S_{\text{ТЗ_УЭ}}, S_{\text{ТЗ_Н}}, S_{\text{ТЗ_КТ}} >, \quad (1)$$

где модели $S_{\text{ТЗ_ТХ}}$ (ТХ – «технические характеристики»); $S_{\text{ТЗ_ТО}}$ (ТО – «техническое обслуживание» – интегральный показатель); $S_{\text{ТЗ_ПО}}$ (ПО – «программное обеспечение»); $S_{\text{ТЗ_УЭ}}$ (УЭ – «условия эксплуатации» – интегральный показатель); $S_{\text{ТЗ_Н}}$ – (Н – «надежность»); $S_{\text{ТЗ_КТ}}$ (КТ – «конструктивные требования» – интегральный показатель) соответствуют пунктам ТЗ.

Модель $S_{\text{ТЗ_ТХ}}$, в свою очередь, представляется в виде

$$S_{\text{ТЗ_ТХ}} = \{ S^{k}_{\text{ТЗ_ТХ}} \},$$

где $k = 0..3$ – уровень иерархии ОП.

Приведем фрагмент базы знаний (БЗ), данные из которой выбираются в соответствии с указанной формулой. При этом будем использовать представление данных в соответствии с синтаксисом языка *Prolog* в виде:

отношение(объект1, объект2),

где *отношение* – терм предиката, а *объект1* и *объект2* – объекты предиката или домены.

Тогда для описания технических характеристик БЦВМ на нулевом уровне иерархии будем использовать следующие предикаты (термы предикатов). Примеры приведены с использованием среды *Prolog*.

процессор (тип, структура).
каналы_В_В (ч_обм_пар, ч_вх, ч_вых, ч_зап_прер, анал_к).
УВВ (тип, вид, режим).
управление_УУ (тип).
интерфейс (вид).
эл_база (тип_эл_базы).

Предикатная формула (логическое правило) будет иметь вид:

ТЗ_техн_хар_БЦВМ_0 : – процессор (тип, структура);

каналы_В_В (Ч_обм_пар, Ч_вх, Ч_вых, Ч_зап_прер, Анал_к);

УВВ (Тип, Вид, Режим), управление_УУ (Тип);

интерфейс (Вид), эл_база (Тип_эл_базы). (2)

Аналогично для первого уровня иерархии имеем следующие логические правила:

ТЗ_техн_хар_БЦВМ_1 : – ТЗ_тх_ОЗУ, ТЗ_тх_АЛУ, ТЗ_тх_УВВ;
ТЗ_тх_УУ.
ТЗ_тх_ОЗУ : – ОЗУ (Емк, Стр, Быстр, Разр).
ТЗ_тх_АЛУ : – АЛУ (Стр, Вр_вып_опер, Дл_разр_сет).
ТЗ_тх_УВВ : – УВВ (Точн_исх_д, Стр_ац_ца, Орг_обм).
ТЗ_тх_УУ : – УУ (Стр, Сост_ком, Форм_ком, Вр_вып). (3)

и предикаты:

ОЗУ (емк, стр, быстр, разр).
АЛУ (стр, вр_вып_опер, дл_разр_сет).
УВВ (точн_исх_д, стр_ац_ца, орг_обм).
УУ (стр, сост_ком, форм_ком, вр_вып).

Подобным образом строятся логические правила для всех остальных пунктов ТЗ.

Окончательно получим в соответствии с (1):

ТЗ_БЦВМ : – ТЗ_тх, ТЗ_то, ТЗ_по, ТЗ_уэ, ТЗ_н, ТЗ_кт.
ТЗ_тх: – ТЗ_техн_хар_БЦВМ_0, ТЗ_техн_хар_БЦВМ_1.
ТЗ_техн_хар_БЦВМ_0 : – <логическое правило (5.2)>.
ТЗ_техн_хар_БЦВМ_1 : – <логическое правило (5.3)>. (4)

и т. д.

Как легко можно видеть, совокупность логических правил (4) есть не что иное, как модель $S_{\text{М_ТЗ}}$.

Запрос к БЗ, реализующий желание пользователя ознакомиться с ТЗ на БЦВМ, в целом будет соответствовать вызову этой модели и иметь вид:

ТЗ_БЦВМ ?

При желании ознакомиться с содержимым какого-либо пункта ТЗ запрос формируется с помощью имени этого пункта, например:
ТЗ_тх_БЦВМ_0 ? или *ТЗ_техн_хар_БЦВМ_1 ?*

Ответ на введенный запрос формируется автоматически в соответствии с логическими правилами при подстановке соответствующих значений доменов предикатов, входящих в эти правила. Значения доменов берутся из БД, содержащей факты или утверждения. Например, утверждение, в соответствии с которым определяются значения доменов предиката

каналы_В_В (ч_обм_пар, ч_вх, ч_вых, ч_зап_прер, анал_к),

будет иметь вид

каналы_В_В (40, 32, 24, 4, "VIDEO RGB").

Синтаксис языка *Prolog* позволяет формировать запросы различной конфигурации, что является несомненным его достоинством. Так, для приведенного примера пользователь имеет возможность сформулировать следующие запросы:

каналы_В_В (Ч_обм_пар, Ч_вх, Ч_вых, Ч_зап_прер, Анал_к) ?
каналы_В_В (X, Y, Z, Q, "VIDEO RGB") ?
каналы_В_В (40, 32, 24, 4, A) ?

и т. д.

По первому запросу выведется вся информация по всем имеющимся каналам ввода/вывода; по второму – информация о каналах ввода/вывода, имеющих тип аналогового канала *VIDEO RGB*, по третьему – выведется тип аналогового канала для УВВ с заданными остальными параметрами.

Очевидно, что подобные запросы могут быть также легко сформулированы относительно остальной информации, хранящейся в БЗ.

2.2. Формализация описания типового процесса проектирования БЦВМ

Для описания и анализа процесса проектирования (ПП) БЦВМ, для единообразия его понимания и оценки необходимо оговорить основные понятия, термины и пути подхода к решению проблемы. В основе упорядочения описания и анализа работ по проектированию БЦВМ положен принцип иерархичности, заключающийся в структурированном представлении ОП по степени детальности описания. В основе такой детализации лежит принцип, принятый в ОКБ: деталь, сборочная единица, комплекс, комплект (уровни иерархии 0...3, приведенные на рис. 2). В качестве основной единицы измерения ПП БЦВМ принята проектная процедура, складывающаяся из проектных операций и заканчивающаяся проектным решением в виде проектного документа.

Для выявления перечня проектных процедур и состава проектных подразделений, участвующих в процессе проектирования БЦВМ, было проведено предпроектное обследование указанного ОКБ.

Существующий ПП БЦВМ, согласно проведенному предпроектному обследованию, сводится к автономному решению частных проектно-конструкторских задач (выполнение проектных процедур и операций) с последующим согласованием проектных решений.

Взаимосвязь и последовательность проектных процедур задаются матрицей последовательности проектных процедур. Кроме того, введены фиктивные вершины (ФВ), которые используются для удобства построения модели ПП. В соответствии с этой матрицей строится граф процесса проектирования БЦВМ.

Приведем пример реализации семиотической модели для схемотехнического проектирования на этапе технического предложения для нулевого уровня иерархии БЦВМ.

Модель для этого случая будет содержать следующие предикаты:

проект_проц (кл1, кл2, кл3, номер, шифр, трудоемкость;
квал_исп, в_док, вых_док, ур_авт, ср_авт, уд_тр).
посл_проц (кл1, кл2, кл3, номер, номер).
пред_проц (кл1, кл2, кл3, номер, номер).
техн_предл : – проект_проц
(ТП,_,_,_,_,_,_,_,_,_,_,_).
сх_техн: – проект_проц (_,СХ,_,_,_,_,_,_,_,_,_).
нул_ур: – проект_проц (_,_,0,_,_,_,_,_,_,_,_).
ПП_БЦВМ: – техн_предл, сх_техн, нул_ур.

Как видно из примера, наличие ключей *кл1*, *кл2* и *кл3*, фиксирующих соответственно этап, вид проектирования и уровень иерархии ОП, снимает ограничения на то, что каждая процедура имела бы уникальный номер во всем ПП. С помощью четвертого предиката из БЗ выбираются все проектные процедуры, относящиеся к этапу технического предложения, пятого – к схемотехническому проектированию, шестого – к нулевому уровню иерархии, и, наконец, седьмого – формируется требуемый вариант организации ПП БЦВМ.

Аналогично задаются предикаты для остальных этапов, видов проектирования и уровней иерархии.

Реализация модели всего процесса проектирования средствами *Prolog* базировалась на использовании логики. База знаний в этом случае состоит из утверждений в виде предложений логики предикатов. Такие предложения либо

описывают данные, либо управляют процессом внутренней унификации среды *Prolog*. Такой процесс является процессом «распознавание – действие». Достоинство подхода, основанного на логике, состоит в том, что он отражает структуру самого языка *Prolog*. Кроме того, при таком способе организации знаний БЗ располагается в файле на диске, в связи с чем ограничения на ее размеры практически отсутствуют.

Утверждения БЗ для модели ПП имеют вид:

rule (1, "PP1", [1, 7, 12, ...])
rule (2, "PP2", [2, 8, ...])
. . .
rule (6, "PP6", [6, 10, ...])
cond(1, "Этап", "ТЗ")
cond(2, "Этап", "ТП")
. . .
cond(6, "Этап", "И")
cond(7, "Вид", "СТР")
cond(8, "Вид", "ФЛ")
. . .
cond(11, "Вид", "К")
cond(12, "Уровень", "УИ0")
. . .
cond(15, "Уровень", "УИ3").

В каждом предложении типа *rule* первый аргумент – номер правила, второй аргумент – вариант организации ПП, третий аргумент – список чисел, задающий номера условий из предложений типа *cond*. Эти предложения содержат характеристики проектных процедур для всех этапов и видов проектирования и уровней иерархии ОП. Списки номеров условий служат для хранения множества фактов, согласно которым выбираются предложения типа *rule*. Добавление и обновление предложений в БЗ являются простыми операциями, и по мере расширения базы программа не требует модификации.

При работе с программой пользователю предоставляется возможность конструировать различные варианты организации ПП в режиме диалога. Ответы пользователя дают информацию для процесса сопоставления по образцу посредством унификации.

Модули пользовательского интерфейса обеспечивают соответствующую графику и удобный для пользователя естественный язык взаимодействия.

2.3. Реализация процедур поиска аналога и оценки реализуемости ТЗ на проектирование БЦВМ

Для предварительной оценки реализуемости ТЗ обычно оказывается достаточным ограничиться рассмотрением нулевого уровня иерархии ОП, так как на этом уровне оценки трудоемкости выполнения отдельных процедур являются интегрированными и учитывают трудоемкости выполнения проектных процедур более низких уровней.

В работе была произведена тестовая проверка разработанных процедур поиска аналога (ППА) и оценки реализуемости (ПОР) на примере частного ТЗ с учетом опыта подобных разработок, имеющегося в ОКБ.

Рассмотрим работу ППА на примере выбора аналога при проектировании вторичного источника питания (ВИП).

В табл. 1 приведены основные характеристические параметры ВИП, по которым осуществлялся поиск аналога.

Таблица 1

Параметр	Диапазон изменения
Потребляемая мощность, Вт	0,15÷54,5
Номинальное напряжение, В	−12,6÷+20,7
Допустимые пульсации, мВ	20÷270
Потребляемый ток, А	0,03÷16
Количество выходных каналов	1÷5
Напряжение первичного источника питания, В	22÷32

На основе экспертной информации для указанных параметров были определены лингвистические переменные $\beta_1 \div \beta_6$ со следующими множествами базовых значений:

$T_1 = \{\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}\} = \{$малая, средняя, большая$\}$,

$T_2 = \{\alpha_{21}, \alpha_{22}, \alpha_{23}\} = \{$близкое к ± 5, близкое к ± 12, большое$\}$,

$T_3 = \{\alpha_{31}, \alpha_{32}, \alpha_{33}\} = \{$малая, около 100, большая$\}$,

$T_4 = \{\alpha_{41}, \alpha_{42}, \alpha_{43}, \alpha_{44}\} = \{$малый, около 1 А, около 8 А, большой$\}$,

$T_5 = \{\alpha_{51}, \alpha_{52}\} = \{$одноканальный, многоканальный$\}$,

$T_6 = \{\alpha_{61}\} = \{$около 28$\}$.

Значения параметров x' и λ π-функций, соответствующих базовым значениям, приведены в табл. 2.

В соответствии с алгоритмом, описанным в [1], был осуществлен поиск объекта-аналога среди трех претендентов. Результаты расчета приведены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, наибольшей степенью аналогичности обладает Объект 2, его и выбираем в качестве аналога. Что касается точности решений, то можно отметить, что в целом ППА дает результат, адекватный тому, который получает опытный проектировщик, что подтверждено контрольным тестированием модели.

Оценка адекватности работы ПОР была осуществлена в диалоговом режиме. Пользовате-

Таблица 2

Лингвистическая переменная	Базовые значения	Значения параметров		Лингвистическая переменная	Базовые значения	Значения параметров	
		x'	λ			x'	λ
β_1	α_{11}	0,15	0,07	β_4	α_{41}	0,03	0,07
	α_{12}	8,4	2,6		α_{42}	1,0	0,5
	α_{13}	54,5	10,5		α_{43}	8,0	4,0
β_2					α_{44}	16,0	5,0
	α_{21}	±12,6	5,5	β_5	α_{51}	1	1
	α_{22}	±5,0	2,5		α_{52}	5	3
	α_{23}	+27,0	10,0				
β_3	α_{31}	20	30	β_6	α_{61}	28,0	4,0
	α_{32}	100	50				
	α_{33}	270	100				

Таблица 3

Параметр (лингвистическая переменная)	Значения функции принадлежности r_{ij}		
	Объект 1	Объект 2	Объект 3
β_1	0,71	0,54	0,21
β_2	0,24	0,61	0,52
β_3	0,61	0,59	0,67
β_4	0,23	0,71	0,32
β_5	0,8	0,8	0,8
β_6	1	1	1
$r\hat{}_j=\Sigma r_{ij}/6$	0,60	0,71	0,59

лю задавались вопросы по возможным вариантам организации ПП в соответствии с разными сценариями. Один из них был реализован средствами *Prolog* на основе использования логики. База знаний при этом содержит множество правил типа *rule* вида:

rule(< номер правила >, < имя оператора >, <[номера условий]>),

где на месте второго аргумента стоит имя оператора в соответствии со сценарием (*ALFA*, *BETA* и т. д.); третий аргумент – перечень условий, приводящих к инициации данного оператора.

Условия имеют вид:

cond (< номер условия >, < вопрос пользователю >),

где на месте второго аргумента стоит вопрос, на который пользователь дает либо положительный, либо отрицательный ответ.

Таким образом, в результате ответов пользователя на предлагаемые вопросы организуется тот или иной вариант сценария диалога с системой поддержки принятия решений (СППР).

В качестве примера приведен алгоритм возможного изменения структуры ПП БЦВМ (рис. 3).

Первоначально определяются значения критериев $C_{ПП}$, $T_{ПП}$ и NKV_n для типового ПП БЦВМ (блок 2), которые затем анализируются (блоки 3, 5, 7). В случае несоответствия значения какого-либо критерия граничному условию производится выход на диалог с пользователем (блоки 4, 6, 8) и предпринимается попытка изменения структуры ПП. Весь алгоритм повторяется M раз. В результате получаем матрицу показателей эффективности $\mathbf{PE}_{M\times N}$.

Далее с помощью процедуры выбора предпочтительного варианта организации процесса проектирования выбирается наиболее эффективный вариант ПП. Проиллюстрируем работу этой процедуры на следующем примере (рис. 3).

Пусть определены следующие исходные данные:

– матрица показателей эффективности $\mathbf{PE}_{4\times3}$

$$\mathbf{PE}_{4\times3}=\begin{array}{c} C_{ПП}\ \ T_{ПП}\ \ NKV_n \\ \begin{matrix} 100 & 5,6 & 325 \\ 96 & 6,0 & 250 \\ 120 & 4,0 & 400 \\ 150 & 3,0 & 200 \end{matrix} \end{array};$$

– количество рангов единой шкалы оценок $D=6$;

– весовые коэффициенты критериев $VN=(0,5;\ 0,3;\ 0,2)$;

– тип шкалы $TS=(1,\ 1,\ 1)$;

– пороговые значения по индексу согласия $p=0,9$ и по индексу несогласия $q=0,7$.

Для данного варианта организации ПП БЦВМ была получена булева матрица превосходства вариантов следующего вида:

$$\mathbf{MB}_{4\times4}=\begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}.$$

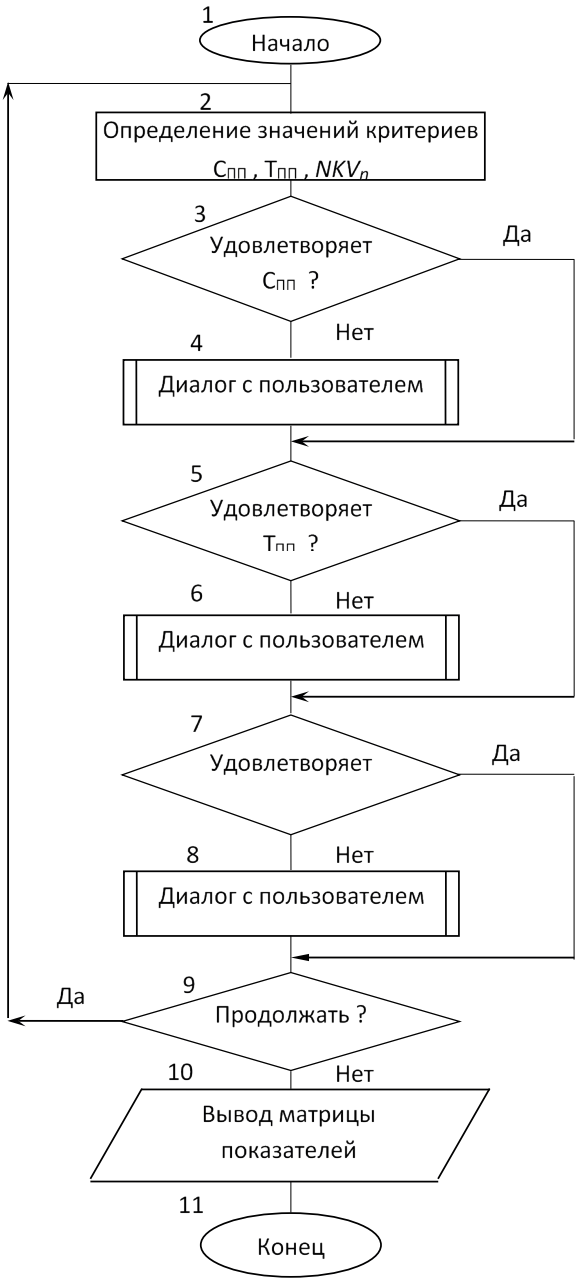


Рис. 3

По этой матрице был сделан вывод о том, что для заданных исходных данных второй вариант организации ПП БЦВМ является предпочтительным.

С помощью специально разработанного интерфейса пользователь имеет возможность достаточно легко исследовать варианты организации ПП для различных исходных данных (например, индексы согласия и несогласия, весовые коэффициенты критериев). При этом, как показали проведенные исследования, наиболее предпочтительный вариант содержится во всех булевых матрицах превосходства, получаемых всякий раз при изменении исходных данных.

Выводы

1. На основании обследования, проведенного в ОКБ, была осуществлена структуризация типового процесса проектирования БЦВМ. Выявлен перечень проектных процедур по этапам, видам проектирования и уровням иерархии БЦВМ.

2. Осуществлена формализация типового ТЗ на проектирование БЦВМ и реализация модели ТЗ средствами языка *Prolog*.

3. Разработана структура программного обеспечения процедур поиска аналога и оценки реализуемости ТЗ, базирующаяся на логике языка *Prolog*.

4. Приведены результаты тестовой проверки разработанных процедур.

5. Разработано программное обеспечение процедуры выбора предпочтительного варианта организации процесса проектирования и приведены результаты его тестирования на примере ПП БЦВМ.

Библиографический список

1. *Kozenko, S. L.* Automatic procedure of technical specification realization ability express-valuation / S. L. Kozenko, V. A. Galanina. St.-Petersburg: Instrumentation in Ecology and Human Safety, 2002. P. 143–147.
2. *Сольницев, Р. И.* Компьютерные системы автоматизации в проектировании и производстве / Р. И. Сольницев, Н. Н. Майоров. СПб.: ГУАП, 2009. 20 с.
3. *Козенко, С. Л.* Информационные технологии на начальных этапах проектирования / С. Л. Козенко, Н. С. Бурмистрова. URL: http://xn----7sbabno2abl4a9aggb.xn--p1ai/computers/informacionnye-tehnologii-na-nachalnyh-etapah-proektirovania.html.

УДК 681.3.062

А. Г. Федоренко*
кандидат технических наук, доцент
В. А. Голубков*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДЕЛЕЙ 3D-ОБЪЕКТОВ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

В статье приведены результаты сравнительного анализа методов построения электронных моделей 3D-объектов сложной конфигурации. Рассмотрены различные типы электронных моделей, выполненные для одного общего объекта. Рассмотрены возможности использования 3D-принтеров для выполнения 3D-объектов сложной конфигурации.

***Ключевые слова**: методы построения электронных моделей 3D-объектов, типы электронных моделей, 3D-объекты сложной конфигурации, условия использования 3D-принтеров.*

A. Fedorenko*
PhD. Tech., Associate Professor
V. Golubkov*
PhD. Tech., Associate Professor
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

METHODS OF CONSTRUCTION OF ELECTRONIC MODELS OF 3D OBJECTS OF COMPLEX CONFIGURATION

The article presents the results of a comparative analysis of methods for constructing electronic models of 3D objects of complex configuration. Various types of electronic models for one common object are considered. The possibilities of using 3D printers to perform 3D objects of complex configuration are considered.

***Keywords:** methods for constructing electronic models of 3D objects, types of electronic models, 3D objects of complex configuration, conditions for using 3D printers.*

Современные графические редакторы (ACAD, Компас, 3DMax и др.) позволяют создавать электронные 3D-модели объектов практически любой степени сложности. При построении моделей сложной конфигурации возникают проблемы с просмотром ее элементов, расположенных внутри модели.

На рис. 1 приведена каркасная модель Чесменского дворца. Каркасные модели позволяют просматривать одновременно и внутренние, и наружные элементы модели.

Стенки каркасной модели прозрачны, что позволяет легко находить необходимые элементы внутри объекта, определять их взаимное расположение, редактировать отдельные элементы.

На рис. 2. приведена твердотельная модель Чесменского дворца. Твердотельные модели наиболее реалистично отображают исходные объекты. Но в этих моделях невозможно осуществлять просмотр элементов, находящихся внутри, без дополнительных преобразований.

Наиболее простым способом таких преобразований является выполнение необходимых разрезов и сечений. На рис. 3. приведен пример горизонтального разреза твердотельной модели Чесменского дворца на уровне второго этажа.

Такой способ применяется для получения статических изображений.

Для получения динамических изображений модели в реальном масштабе времени используются так называемые движки. Движок – специальный программный продукт, позволяющий рассматривать объекты с помощью управляемой передвижной камеры. При этом можно получать изображение объекта и его элементов как снаружи, так и изнутри. С помощью

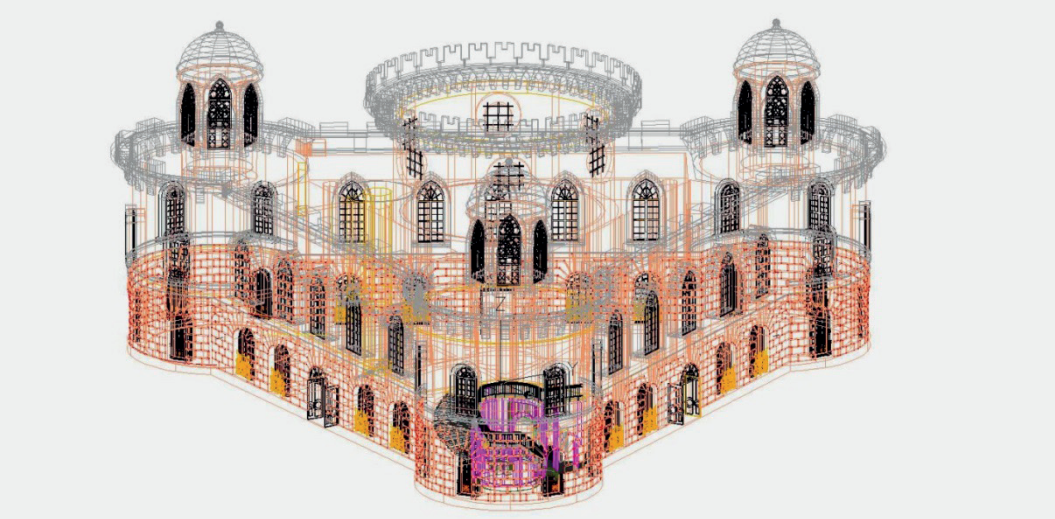


Рис. 1. Каркасная модель Чесменского дворца

Рис. 2. Твердотельная модель Чесменского дворца

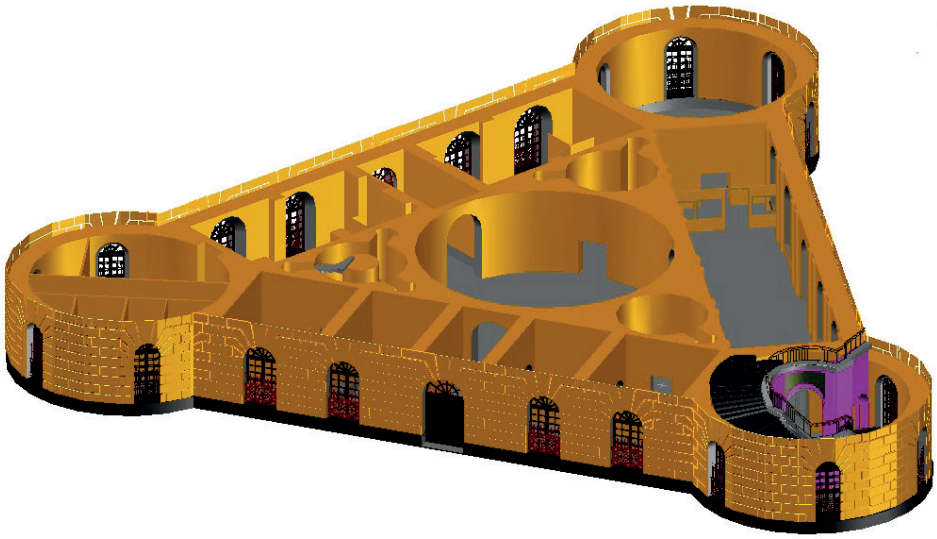


Рис. 3. Горизонтальный разрез твердотельной модели Чесменского дворца на уровне второго этажа

Рис. 4. Изображение здания Чесменского дворца, полученное с помощью движка

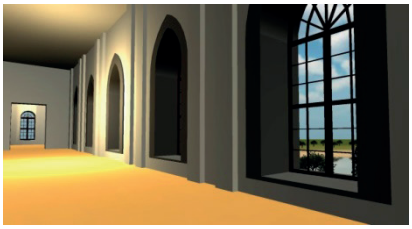


Рис. 5. Изображение внутреннего интерьера здания, полученное с помощью движка

кнопок управления можно перемещать камеру в 3D-пространстве, изменять скорость передвижения, регулировать коэффициент увеличения изображения, угол поворота объектива. На рис. 4 приведено изображение, полученное с помощью движка, используемого совместно с твердотельной моделью здания Чесменского дворца.

Используя кнопки управления камерой, можно перемещаться снаружи и внутри здания. Изображение внутреннего интерьера здания, полученное с помощью движка, приведено на рис. 5.

Современные 3D-принтеры позволяют получать реальные 3D-объекты, соответствующие их электронным копиям. Принцип послойного построения модели ограничивают типы объектов, которые можно реализовать с помощью этих

Рис. 6. Пример модели, реализуемой на 3D-принтере

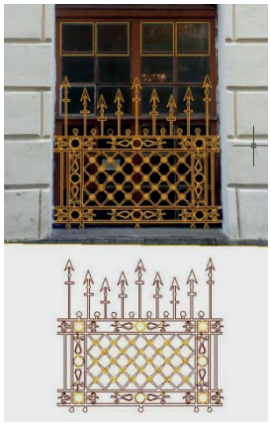


Рис. 7. Решетка окна Чесменского дворца и ее электронная 3D-модель

устройств. На рис. 6. приведена модель значка, легко реализуемого с помощью 3D-принтера.

3D-модели, имеющие внутренние элементы, координаты которых по направлению наращивания слоя начинаются не с его основания, или имеющие по этому направлению прерывания, не могут быть реализованы на 3D-принтере.

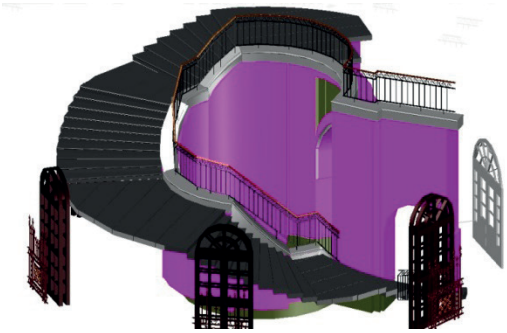


Рис. 8. Сборочная 3D-единица «Центральная лестница»

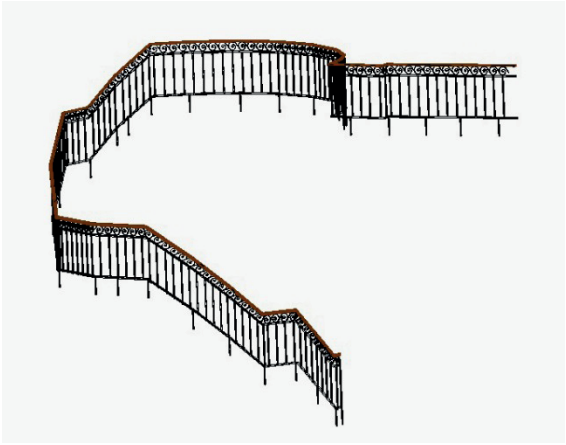


Рис. 9. 3D-блок «Перила»

На рис. 7 приведена фотография решетки окна Чесменского дворца и электронная 3D-модель решетки.

Электронная 3D-модель решетки создана путем моделирования ее отдельных частей с последующей электронной сборкой и объединением в единую модель.

Создание решетки с помощью 3D-принтера возможно, только если эта операция выполняется в горизонтальной плоскости. При вертикальном расположении решетки в составе здания ее изготовление на 3D-принтере становится невозможным.

Электронные 3D-модели устройств сложной конфигурации представляют собой электронные сборочные 3D-чертежи, составленные из отдельных 3D-деталей и сборочных единиц. Сборка осуществляется с помощью 3D-привязок. На рис. 8. приведена сборочная 3D-единица «Центральная лестница», которая установлена в электронной модели первого этажа здания (рис. 3).

3D-модели сборочных единиц также содержат составные части, изготавливаемые из отдельных деталей и блоков. Например, ограда и перила лестницы собираются из отдельных деталей. На рис. 9 приведено изображение блока «Перила», который в свою очередь содержит множество вспомогательных 3D-деталей.

Построение блока «Перила» на 3D-принтере в том виде, в каком он изображен на рис. 9, не предоставляется возможным. Однако возможно поэтапное изготовление всех деталей блока «Перила» с их последующей сборкой.

Таким образом, процесс сборки электронных 3D-моделей сборочных единиц и создание реальных объектов, собранных из деталей, выполненных на 3D-принтере, идентичны и отличаются только точностью изготовления и сборки.

Библиографический список

1. *Федоренко, А. Г.* Использование объектных привязок при создании электронных моделей 3D-объектов сложной конфигурации / А. Г. Федоренко, В. А. Голубков. СПб.: ГУАП, 2015. С. 220–226.
2. *Федоренко, А. Г.* Преобразование рабочих чертежей в электронные 3D-модели объектов / А. Г. Федоренко, В. А. Голубков. СПб.: ГУАП, 2017. С. 81–85.
3. *Федоренко, А. Г.* Проекционное черчение в среде ACAD: учеб. пособие. СПб.: ГУАП, 2009. 56 с.

УДК 517.957

А. О. Смирнов*
доктор физико-математических наук, доцент
Ву Ван Диен*
аспирант кафедры высшей математики и механики
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

О ПЕРИОДИЧЕСКОМ РЕШЕНИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ВТОРОГО ПОРЯДКА С НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ В ВИДЕ ГИСТЕРЕЗИСА

В настоящей работе найдены условия на параметры нелинейной модели, при которых существуют периодические автоколебания, и вычислен период этих колебаний.

***Ключевые слова**: нелинейная модель, гистерезис, автоколебания.*

A. O. Smirnov*
PhD. Phys.-Math, Associate Professor
By Ван Диен*
PhD. Student
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ON THE PERIODIC SOLUTION OF THE DIFFERENTIAL EQUATION OF THE SECOND ORDER WITH NONLINEARITY IN THE FORM OF HYSTERESIS

In the present paper, we find the conditions for the parameters of the nonlinear model for which there exist periodic self-oscillations, and we calculated the period of these oscillations.

***Keywords:** nonlinear model, hysteresis, self-oscillations.*

Настоящая работа посвящена рассмотрению простейшей модели нелинейных колебаний под действием управляющей силы, имеющей форму гистерезиса, с учетом силы сопротивления, пропорциональной скорости. В этой работе мы исследуем задачу зависимости параметров периодических колебаний от параметров модели.

Предположим, что на пружине подвешено тело (см. рис. 1), на которое действуют сила упругости $F_k = -kx$, сила сопротивления $F_a = -\mu\dot{x}$, сила тяжести $F_g = mg$ и управляющая сила F:

$$m\ddot{x} = -kx - \mu\dot{x} + mg + F$$

или

$$m\ddot{x} + \mu\dot{x} + kx = f(x), \qquad (1)$$

где управляющая функция задается следующим образом:

$$f(x) = \begin{cases} -A, x > a \\ A, x < -a \end{cases}.$$

При $-a \le x \le a$ функция $f(x)$ сохраняет свое предыдущее значение (см. рис. 2). Решение ищется непрерывное и с непрерывной первой производной. Необходимо найти зависимость частоты установившихся колебаний от параметров уравнения.

Составляем характеристическое уравнение [1–3]:

$$m\lambda^2 + \mu\lambda + k = 0. \qquad (2)$$

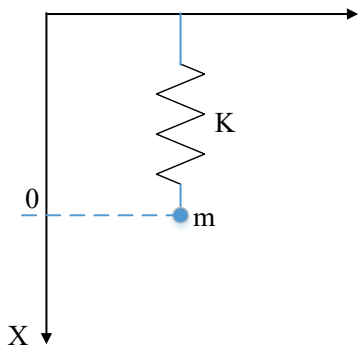


Рис. 1. Модель

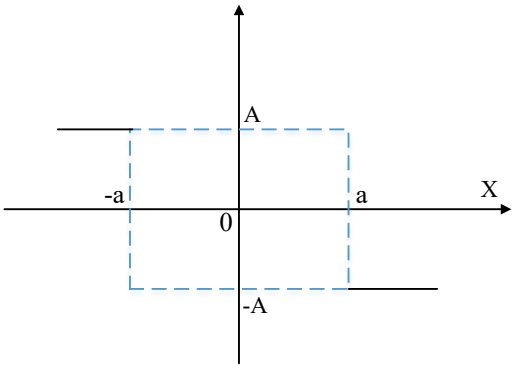


Рис. 2. Управляющая функция

Дискриминант равен $D=\mu^2-4mk$ и при слабом сопротивлении является отрицательным $D<0$. Следовательно, в этом случае корни характеристического уравнения являются комплексными:

$$\lambda_{1,2}=\frac{-\mu\pm i\sqrt{4km-\mu^2}}{2}.$$

Соответственно, общее решение однородного уравнения будет иметь вид [1–3]

$$x_{odn}=C_1e^{-\alpha t}\cos\beta t+C_2e^{-\alpha t}\sin\beta t,$$

где

$$\alpha=\frac{\mu}{2},\quad \beta=\frac{1}{2}\sqrt{4km-\mu^2}.$$

Таким образом, без учета управляющего воздействия решением уравнения будут затухающие колебания с периодом

$$T=\frac{2\pi}{\beta}=\frac{4\pi}{\sqrt{4km-\mu^2}}.$$

Управляющее воздействие зависит от положения тела, поэтому надо рассматривать два варианта расположения тела.

В первом варианте в начальный момент времени $x\ge a$ и $f(x)=-A$, т. е.

$$m\ddot{x}+\mu\dot{x}+kx=-A. \qquad (3)$$

В этом случае частным решением уравнения (3) является постоянная функция [1–3]

$$x^*=C_+,\quad \dot{x}^*=0,\quad \ddot{x}^*=0.$$

Подставляя эту функцию и ее производные в уравнение (3), получаем

$$x^*=C_+=-\frac{A}{k}.$$

Т. е. на первом этапе решение уравнения (1.1) имеет вид

$$x=C_1^1e^{-\alpha t}\cos\beta t+C_2^1e^{-\alpha t}\sin\beta t-\frac{A}{k}. \qquad (4)$$

При больших временах

$$e^{-\alpha t}\xrightarrow[t\to+\infty]{}0\quad\text{и}\quad x\xrightarrow[t\to+\infty]{}-\frac{A}{k}.$$

Для того чтобы в модели возникли автоколебания, необходим переход тела во второй вариант его расположения, т. е. необходимо выполнение условия

$$x=-\frac{A}{k}<-a\quad\text{или}\quad A>ka.$$

В области $x\le -a$ управляющее воздействие равно $f=A$ и уравнение (1) имеет вид

$$m\ddot{x}+\mu\dot{x}+kx=A. \qquad (5)$$

Частным решением уравнения (5) также является постоянная функция $x^*=C_-$.

Вычисляя постоянную C_-, получаем $C_-=\frac{A}{k}$.

Поэтому общее решение уравнения (1) на втором участке имеет вид

$$\tilde{x}=C_1^2e^{-\alpha t}\cos\beta t+C_2^2e^{-\alpha t}\sin\beta t+\frac{A}{k}. \qquad (6)$$

Поскольку

$$e^{-\alpha t}\xrightarrow[t\to+\infty]{}0,$$

то

$$\tilde{x}\xrightarrow[t\to+\infty]{}\frac{A}{k}>a,$$

и тело автоматически вернется на первый участок, где модель движения будет описываться формулой (4), и, следовательно, тело далее вновь перейдет на второй участок, т. е. возникнет режим автоколебаний.

Предположим, что установился режим периодических автоколебаний с полупериодом Δt (см. рис. 3):

$$x(0)=a,x(\Delta t)=-a,x(2\Delta t)=a,x(3\Delta t)=-a,\ldots$$

Из формулы (4) вытекают следующие условия на постоянные C_1^1 и C_2^1:

$$x\big|_{t=0}=C_1^1-\frac{A}{k}=a,$$

$$x\big|_{t=\Delta t}=C_1^1e^{-\alpha\Delta t}\cos(\beta\Delta t)+C_2^1e^{-\alpha\Delta t}\sin(\beta\Delta t)-\frac{A}{k}=-a.$$

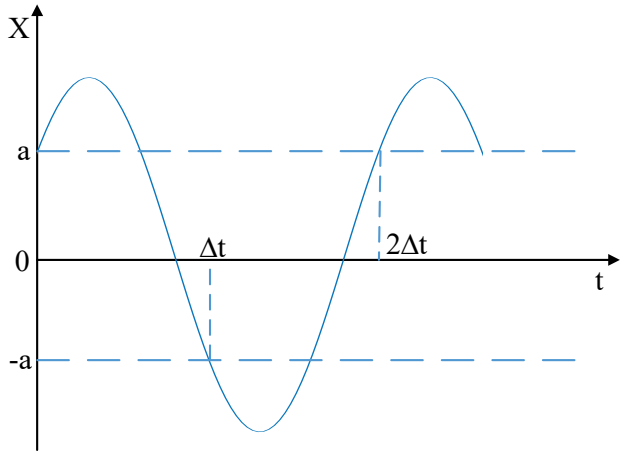


Рис. 3. Режим периодических автоколебаний

Решая данную систему относительно C_j^1, получаем следующие значения произвольных постоянных решения краевой задачи первого участка:

$$C_1^1 = \frac{A+ka}{k}, \tag{7}$$

$$C_2^1 = \frac{(A-ka)e^{\alpha\Delta t} - (A+ka)\cos(\beta\Delta t).}{k\sin(\beta\Delta t)} \tag{8}$$

Аналогичным образом находятся значения постоянных C_1^2 и C_2^2.

$$\begin{cases} \tilde{x}(\Delta t) = C_1^2 e^{-\alpha\Delta t}\cos(\beta\Delta t) + \\ +C_2^2 e^{-\alpha\Delta t}\sin(\beta\Delta t) + \dfrac{A}{k} = -a, \\ \tilde{x}(2\Delta t) = C_1^2 e^{-\alpha 2\Delta t}\cos(\beta 2\Delta t) + \\ +C_2^2 e^{-\alpha 2\Delta t}\sin(\beta 2\Delta t) + \dfrac{A}{k} = a, \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} C_1^2 e^{-\alpha\Delta t}\cos(\beta\Delta t) + C_2^2 e^{-\alpha\Delta t}\sin(\beta\Delta t) = -\dfrac{A+ka}{k}, \\ C_1^2 e^{-2\alpha\Delta t}\cos(2\beta\Delta t) + C_2^2 e^{-\alpha 2\Delta t}\sin(2\beta\Delta t) = -\dfrac{A-ka}{k}. \end{cases} \tag{9}$$

Вычисляя определитель системы, получаем

$$\Delta = \begin{vmatrix} e^{-\alpha\Delta t}\cos(\beta\Delta t) & e^{-\alpha\Delta t}\sin(\beta\Delta t) \\ e^{-2\alpha\Delta t}\cos(\beta 2\Delta t) & e^{-2\alpha\Delta t}\sin(\beta 2\Delta t) \end{vmatrix} = e^{-3\alpha\Delta t}\sin(\beta\Delta t).$$

Предположим, что этот определитель равен нулю $\Delta = 0$.

Тогда

$$\sin(\beta\Delta t) = 0, \quad \sin(2\beta\Delta t) = 0, \quad \cos(\beta\Delta t) = \pm 1, \quad \cos(2\beta\Delta t) = 1.$$

В этом случае уравнения системы (9) примут вид

$$\pm C_1^2 e^{-\alpha\Delta t} = -\frac{A+ka}{k}, \quad C_1^2 e^{-2\alpha\Delta t} = -\frac{A-ka}{k}. \tag{10}$$

Решая уравнения (10), получаем

$$\Delta t = \frac{1}{\alpha}\ln\left(\frac{A+ka}{A-ka}\right), \quad C_1^2 = -\frac{(A+ka)^2}{k(A-ka)}.$$

Очевидно, что данный режим возможен, только если выполняется следующее условие на параметры модели:

$$A = ka\frac{e^{2\pi n\alpha/\beta}+1}{e^{2\pi n\alpha/\beta}-1} \equiv ka\,\mathrm{cth}\left(\frac{\pi n\alpha}{\beta}\right), \quad n \in \mathbb{Z}. \tag{11}$$

Таким образом, при выполнении условия (11) в модели (1) возникает явление нелинейного резонанса. Следовательно, для установления режима автоколебаний параметры модели не должны удовлетворять условию (11), причем желательно, чтобы отличие было достаточно значительным.

Предположим теперь, что управляющее воздействие не удовлетворяет (11). Тогда систему (9) можно решать методом Крамера. Вычисляя вспомогательные определители, имеем

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} -\dfrac{A+ka}{k} & e^{-\alpha\Delta t}\sin(\beta\Delta t) \\ -\dfrac{A-ka}{k} & e^{-2\alpha\Delta t}\sin(2\beta\Delta t) \end{vmatrix} = -\left(\frac{A+ka}{k}\right)e^{-2\alpha\Delta t}\sin(2\beta\Delta t) + \left(\frac{A-ka}{k}\right)e^{-\alpha\Delta t}\sin(\beta\Delta t)$$

и

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} e^{-\alpha\Delta t}\cos(\beta\Delta t) & -\dfrac{A+ka}{k} \\ e^{-2\alpha\Delta t}\cos(2\beta\Delta t) & -\dfrac{A-ka}{k} \end{vmatrix} = -\left(\frac{A-ka}{k}\right)e^{-\alpha\Delta t}\cos(\beta\Delta t) + 2\left(\frac{A+ka}{k}\right)e^{-2\alpha\Delta t}\cos(2\beta\Delta t).$$

Применяя формулы Крамера, имеем

$$C_1^2 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \left(\frac{A-ka}{k}\right)e^{2\alpha\Delta t} - \\ -2\left(\frac{A+ka}{k}\right)e^{\alpha\Delta t}\cos(\beta\Delta t), \quad (12)$$

и

$$C_2^2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \\ = \frac{\left(\begin{matrix}(A+ka)e^{\alpha\Delta t}\cos(2\beta\Delta t) - \\ -(A-ka)e^{2\alpha\Delta t}\cos(\beta\Delta t)\end{matrix}\right)}{k\sin(\beta\Delta t)}. \quad (13)$$

Для вычисления величины Δt воспользуемся условиями непрерывности решения и первой производной в момент времени, равный Δt:

$$x\big|_{\Delta t} = \tilde{x}\big|_{\Delta t}, \quad \dot{x}\big|_{\Delta t} = \dot{\tilde{x}}\big|_{\Delta t},$$

где

$$\dot{x} = (\beta C_2^1 - \alpha C_1^1)e^{-\alpha t}\cos(\beta t) - (\beta C_1^1 + \alpha C_2^1)e^{-\alpha t}\sin(\beta t)$$

и

$$\dot{\tilde{x}} = (\beta C_2^2 - \alpha C_1^2)e^{-\alpha t}\cos(\beta t) - (\beta C_1^2 + \alpha C_2^2)e^{-\alpha t}\sin(\beta t).$$

Из непрерывности решений вытекает равенство

$$\left(C_1^2 - C_1^1\right)e^{-\alpha\Delta t}\cos(\beta\Delta t) + \\ + \left(C_2^2 - C_2^1\right)e^{-\alpha\Delta t}\sin(\beta\Delta t) = -\frac{2A}{k}, \quad (14)$$

а из непрерывности производных следует соотношение

$$B_1 e^{-\alpha\Delta t}\cos(\beta\Delta t) - B_2 e^{-\alpha\Delta t}\sin(\beta\Delta t) = 0, \quad (15)$$

где

$$B_1 = \beta\left(C_2^2 - C_2^1\right) - \alpha\left(C_1^2 - C_1^1\right),$$
$$B_2 = \beta\left(C_1^2 - C_1^1\right) + \alpha\left(C_2^2 - C_2^1\right).$$

Введем обозначения:

$$C_1^\Delta = C_1^2 - C_1^1, \quad C_2^\Delta = C_2^2 - C_2^1,$$
$$A_- = A - ka, \quad A_+ = A + ka.$$

Из соотношений (7), (8), (12), (13) следует, что

$$C_1^\Delta = \frac{A_-}{k}e^{2\alpha\Delta t} - \frac{A_+}{k}\left(2e^{\alpha\Delta t}\cos(\beta\Delta t) + 1\right), \quad (16)$$

$$C_2^\Delta = \frac{\left(\begin{matrix}A_+\left(e^{\alpha\Delta t}\cos(2\beta\Delta t) + \cos(\beta\Delta t)\right) - \\ -A_-\left(e^{2\alpha\Delta t}\cos(\beta\Delta t) + e^{\alpha\Delta t}\right)\end{matrix}\right)}{k\sin(\beta\Delta t)}. \quad (17)$$

Решая получающуюся из уравнений (14) и (15) систему

$$\begin{cases} C_1^\Delta e^{-\alpha\Delta t}\cos(\beta\Delta t) + C_2^\Delta e^{-\alpha\Delta t}\sin(\beta\Delta t) = -\dfrac{2A}{k}, \\ B_1 e^{-\alpha\Delta t}\cos(\beta\Delta t) - B_2 e^{-\alpha\Delta t}\sin(\beta\Delta t) = 0, \end{cases}$$

методом Крамера относительно C_1^Δ и C_2^Δ, имеем

$$\Delta = \\ = \begin{vmatrix} e^{-\alpha\Delta t}\cos(\beta\Delta t) & e^{-\alpha\Delta t}\sin(\beta\Delta t) \\ -e^{-\alpha\Delta t}\left(\begin{matrix}\alpha\cos(\beta\Delta t) + \\ +\beta\sin(\beta\Delta t)\end{matrix}\right) & e^{-\alpha\Delta t}\left(\begin{matrix}\beta\cos(\beta\Delta t) - \\ -\alpha\sin(\beta\Delta t)\end{matrix}\right) \end{vmatrix} = \\ = \beta e^{-2\alpha\Delta t},$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} -2A/k & e^{-\alpha\Delta t}\sin(\beta\Delta t) \\ 0 & e^{-\alpha\Delta t}\left(\beta\cos(\beta\Delta t) - \alpha\sin(\beta\Delta t)\right) \end{vmatrix} = \\ = \frac{-2Ae^{-\alpha\Delta t}\left(\beta\cos(\beta\Delta t) - \alpha\sin(\beta\Delta t)\right)}{k},$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} e^{-\alpha\Delta t}\cos(\beta\Delta t) & -2A/k \\ -e^{-\alpha\Delta t}\left(\alpha\cos(\beta\Delta t) + \beta\sin(\beta\Delta t)\right) & 0 \end{vmatrix} = \\ = \frac{-2Ae^{-\alpha\Delta t}\left(\alpha\cos(\beta\Delta t) + \beta\sin(\beta\Delta t)\right)}{k}.$$

Следовательно,

$$C_1^\Delta = \frac{-2Ae^{\alpha\Delta t}\left(\beta\cos(\beta\Delta t) - \alpha\sin(\beta\Delta t)\right)}{k\beta}, \quad (18)$$

$$C_2^\Delta = \frac{-2Ae^{\alpha\Delta t}\left(\alpha\cos(\beta\Delta t) + \beta\sin(\beta\Delta t)\right)}{k\beta}. \quad (19)$$

Таким образом, для существования периодических автоколебаний необходимо одновременное выполнение двух трансцендентных уравнений, которые вытекают из равенств двух различных представлений для постоянных C_1^Δ и C_2^Δ. Следствием формул (16) и (18) является уравнение

$$A_- e^{2\alpha\Delta t} = A_+ + \\ + 2\left(ka\cos(\beta\Delta t) + A\frac{\alpha}{\beta}\sin(\beta\Delta t)\right)e^{\alpha\Delta t}, \quad (20)$$

а из (17) и (19) вытекает соотношение

$$A_e^{2\alpha\Delta t} = A_+ - \\ -2\left(ka\cos(\beta\Delta t) + A\frac{\alpha}{\beta}\sin(\beta\Delta t) \right) e^{\alpha\Delta t}. \qquad (21)$$

Подставляя (21) в (20), получаем

$$ka\cos\left(\beta\Delta t\right) + \frac{A\alpha}{\beta}\sin\left(\beta\Delta t\right) = 0. \qquad (22)$$

Упрощая последнее уравнение, получаем следующее условие на Δt:

$$\mathrm{tg}(\hat{a}\Delta t) = -\frac{ka\hat{a}}{A\acute{a}}.$$

Поскольку правая часть этого условия отрицательна, то

$$\beta\Delta t = \pi - \mathrm{arctg}\left(\frac{ka\beta}{A\alpha}\right).$$

Следовательно, полупериод колебаний равен

$$\Delta t = \frac{1}{\beta}\left(\pi - \mathrm{arctg}\left(\frac{ka\beta}{A\alpha}\right)\right).$$

Подставляя (22) в (20) или в (21), получаем

$$A_e^{2\alpha\Delta t} = A_+ \text{ или } \Delta t = \frac{1}{2\alpha}\ln\frac{A_+}{A_}.$$

Таким образом, рассматриваемая модель имеет периодическое решение при выполнении следующих условий на параметры модели:

$$\frac{A_+}{A_} = \exp\left\{\frac{2\alpha}{\beta}\left(\pi - \mathrm{arctg}\frac{ka\beta}{A\alpha}\right)\right\}.$$

В остальных случаях рассматриваемое уравнение будет иметь почти-периодическое решение.

Библиографический список

1. *Филиппов, А. Ф.* Введение в теорию дифференциальных уравнений. М.: КомКнига, 2010. 240 с.
2. *Макарова, М. В.* Дифференциальные и разностные уравнения / М. В. Макарова, А. О. Смирнов. Ч. I. СПб.: ГУАП. 123 с.
3. *Гордин, В. А.* Дифференциальные и разностные уравнения. Какие явления они описывают и как их решать. М.: ВШЭ, 2016.

УДК 517.923

А. О. Смирнов
доктор физико-математических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ЭЛЛИПТИЧЕСКИЕ СОЛИТОНЫ И УРАВНЕНИЯ ПИКАРА – ФУКСА

В настоящей работе приводится метод построения гиперэллиптических интегралов, редуцируемых к эллиптическим, и даются многочисленные примеры гиперэллиптических интегралов, удовлетворяющих уравнениям Пикара – Фукса.

***Ключевые слова**: редукция, эллиптический интеграл, гиперэллиптический дифференциал, гипергеометрическое уравнение, уравнение Гойна, уравнение Пикара – Фукса.*

A. O. Smirnov
PhD. Phys.-Math, Associate Professor
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

ELLIPTIC SOLITONS AND PICARD-FUCHS EQUATIONS

In this paper, we present a method for constructing hyperelliptic integrals reduced to elliptic and give numerous examples of hyperelliptic integrals satisfying Picard-Fuchs equations.

***Keywords:** reduction, elliptic integral, hyperelliptic differential, hypergeometric equation, Heun equation, Picard-Fuchs equation.*

В 2002 году [1] автором был найден класс конечнозонных уравнений Гойна и предложен простой метод получения уравнений гиперэллиптических кривых, накрывающих эллиптические. Заметим, что этот метод не давал ни формул для накрывающих отображений, ни выражений для редуцирующихся гиперэллиптических интегралов. В настоящей работе мы предлагаем простой метод нахождения редуцирующихся интегралов и приводим примеры применения этого метода.

Хорошо известно, что существует гипергеометрическое уравнение, имеющее общее решение в виде линейной комбинации полных эллиптических интегралов (см., например, [2]). Для объяснения этого факта рассмотрим голоморфный дифференциал $u=dt/s$ на эллиптической кривой

$$\Gamma_0: \quad s^2 = t(t-\alpha)(t-\beta) \tag{1}$$

и дважды его продифференцируем по параметру α:

$$u_\alpha = \frac{t(t-\beta)dt}{2s^3}, \quad u_{\alpha\alpha} = \frac{3t^2(t-\beta)^2 dt}{4s^5}.$$

Дифференциалы u_α и $u_{\alpha\alpha}$ являются эллиптическими дифференциалами второго рода с единственными полюсами в точке ветвления $t=\alpha$. Поскольку на эллиптической кривой (1) существует мероморфная функция

$$\mu = \frac{a_0(t-\beta)^2 t^2}{s^3}$$

с единственным полюсом третьего порядка в точке $t=\alpha$, то существуют постоянные c_k, такие, что выполняется равенство

$$u_{\alpha\alpha} + c_1 u_\alpha + c_2 u = d\mu. \tag{2}$$

Непосредственные вычисления дают следующие значения постоянных:

$$a_0 = \frac{-1}{2\alpha(\alpha-\beta)}, \quad c_1 = \frac{2\alpha-\beta}{\alpha(\alpha-\beta)}, \quad c_2 = \frac{1}{4\alpha(\alpha-\beta)}.$$

Поскольку интеграл по любому замкнутому контуру на алгебраической кривой от дифференциала мероморфной функции равен нулю, то, интегрируя уравнение (2), мы получаем, что уравнению

$$U_{\alpha\alpha} + \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha-\beta}\right)U_\alpha + \frac{1}{4\alpha(\alpha-\beta)}U = 0 \tag{3}$$

удовлетворяют интегралы от дифференциала u по любому замкнутому контуру на эллиптической кривой (1).

Уравнение (3) является частным случаем уравнения Пикара – Фукса второго порядка, которое называется гипергеометрическим уравнением [2, 3]. Его общее решение есть линейная комбинация двух линейно независимых решений, являющихся интегралами от дифференциала u по a- и b-циклам на кривой (1). Заметим, что уравнение (3) – это специальный случай гипергеометрического уравнения, которое в общем случае зависит от трех параметров [2].

Данный факт можно использовать для поиска гиперэллиптических интегралов, редуцируемых к эллиптическим. Процедура поиска основывается на том, что, если существует отображение

$$\sigma:(w,\lambda)\to(s,t), \tag{4}$$

гиперэллиптической кривой рода g

$$\Gamma:\quad w^2=\prod_{j=1}^{2g-1}(\lambda-\lambda_j) \tag{5}$$

на эллиптическую кривую (1), то оно порождает отображения базисов циклов $\hat{\sigma}:\ell\to\ell_0$ и голоморфных дифференциалов $\sigma^*:u\to\omega$, такие, что выполняется равенство

$$\int\limits_{\ell}\omega=\int\limits_{\ell}\sigma^*u=\int\limits_{\hat{\sigma}\ell}u=\int\limits_{\ell_0}u.$$

Таким образом, интеграл от дифференциала ω по любому замкнутому контуру на гиперэллиптической кривой (5) равен интегралу от дифференциала u по некоторому замкнутому контуру на эллиптической кривой (1), т. е. удовлетворяет уравнению (3). Следовательно, для дифференциала ω является верным равенство

$$\omega_{\alpha\alpha}+\frac{2\alpha-\beta}{\alpha(\alpha-\beta)}\omega_\alpha+\frac{1}{4\alpha(\alpha-\beta)}\omega=d\tilde{\mu}, \tag{6}$$

где $\tilde{\mu}$ – некоторая мероморфная функция на гиперэллиптической кривой (5). Соответственно, редуцируемым дифференциалом на кривой (5) является голоморфный дифференциал, удовлетворяющий уравнению (6). При этом знание конкретных формул отображения (4) нигде не требуется и нигде не используется.

Пример 1. Рассмотрим гиперэллиптическую кривую рода $g=2$:

$$w^2=(\lambda-\alpha-\beta)(\lambda-\alpha-4\beta)\times$$
$$\times(\lambda-4\alpha-\beta)(\lambda^2-4(\alpha+\beta)\lambda+12\alpha\beta), \tag{7}$$

являющуюся спектральной кривой двухзонного потенциала Ламе [1, 4, 5]. Известно (см., например, [4, 5]), что редуцируемый голоморфный дифференциал на гиперэллиптической кривой рода $g=2$ должен иметь вид

$$\omega=\frac{n\lambda+k\alpha+m\beta}{w}d\lambda, \tag{8}$$

где n – число листов накрывающего отображения, k, m – некоторые постоянные. Мероморфную функцию будем искать в виде

$$\tilde{\mu}=a_0\frac{n\lambda^7+\sum\limits_{k=1}^{7}a_k\lambda^{7-k}}{w^3}. \tag{9}$$

Подставляя (8) и (9) в (6) и упрощая, получаем, что в случае спектральной кривой (7) дифференциал (8) имеет вид

$$\omega=\frac{3\lambda-6\alpha-6\beta}{w}d\lambda,$$

а коэффициенты a_j мероморфной функции (9) равны

$$a_0=\frac{-1}{2\alpha(\alpha-\beta)},\quad a_1=-18(\alpha+3\beta),$$
$$a_2=3(7\alpha^2+101\alpha\beta+125\beta^2),$$
$$a_3=6(7\alpha^3-63\alpha^2\beta-315\alpha\beta^2-212\beta^3),$$
$$a_4=-9(16\alpha^4+24\alpha^3\beta-241\alpha^2\beta^2-607\alpha\beta^3-244\beta^4),$$
$$a_5=6(16\alpha^5+176\alpha^4\beta-25\alpha^3\beta^2-$$
$$-800\alpha^2\beta^3-1243\alpha\beta^4-304\beta^5),$$
$$a_6=36\beta(-16\alpha^5-56\alpha^4\beta+37\alpha^3\beta^2+$$
$$+95\alpha^2\beta^3+124\alpha\beta^4+16\beta^5),$$
$$a_7=432\alpha\beta^2(\alpha-\beta)(\alpha+\beta)(2\alpha^2+\alpha\beta+2\beta^2).$$

Пример 2. Рассмотрим спектральную кривую одного из двухзонных 4-эллиптических потенциалов Дарбу – Трейбича – Вердье [1, 4]:

$$w^2=(\lambda-3(\alpha+\beta))(\lambda^2-2\beta\lambda-3\beta(4\alpha+\beta))\times$$
$$\times(\lambda^2-2\alpha\lambda-3\alpha(\alpha+4\beta)). \tag{10}$$

Редуцируемый голоморфный дифференциал и соответствующая мероморфная функция по-прежнему задаются равенствами (8) и (9), но поскольку изменилась функция w, то меняются значения всех постоянных.

В случае спектральной кривой (10) дифференциал ω имеет вид

$$\omega=\frac{4\lambda-6\alpha-6\beta}{w}d\lambda,$$

а коэффициенты мероморфной функции (9) равны

$$a_0 = \frac{-1}{2\alpha(\alpha-\beta)}, \quad a_1 = -2(9\alpha+17\beta),$$
$$a_2 = 8(6\alpha^2+3\alpha\beta+5\beta^2),$$
$$a_3 = -6(15\alpha^3-14\alpha^2\beta-109\alpha\beta^2-40\beta^3),$$
$$a_4 = -108\beta(4\alpha^3+7\alpha^2\beta+14\alpha\beta^2+4\beta^3),$$
$$a_5 = 54\beta(\alpha+\beta)(27\alpha^3-20\alpha^2\beta-37\alpha\beta^2-5\beta^3),$$
$$a_6 = 324\beta(-\alpha^5+4\alpha^4\beta+4\alpha^3\beta^2+29\alpha^2\beta^3+13\alpha\beta^4+\beta^5),$$
$$a_7 = -1458\alpha\beta^2(\alpha-b)(\alpha+\beta)(2\alpha^2+\alpha\beta+2\beta^2).$$

Пример 3. Рассмотрим спектральную кривую одного из двухзонных 5-эллиптических потенциалов Дарбу – Трейбича – Вердье [1, 4]:

$$w^2 = (\lambda+3\alpha-8\beta)(\lambda+3\alpha+\beta)\times$$
$$\times(\lambda^3+4(\alpha-2\beta)\lambda^2-16\alpha\beta\lambda+64\alpha\beta^2). \qquad (11)$$

В этом случае дифференциал ω равен

$$\omega = \frac{5\lambda+12\alpha-16\beta}{w}d\lambda,$$

а коэффициенты мероморфной функции (9) имеют вид

$$a_0 = \frac{-1}{2\alpha(\alpha-\beta)}, \quad a_1 = 4(9\alpha-22\beta),$$
$$a_2 = 75\alpha^2-507\alpha\beta+355\beta^2,$$
$$a_3 = 12(3\alpha^3-67\alpha^2\beta+139\alpha\beta^2+80\beta^3),$$
$$a_4 = -16\beta(18\alpha^3-201\alpha^2\beta-87\alpha\beta^2+352\beta^3),$$
$$a_5 = 64\beta^2(81\alpha^3-195\alpha^2\beta-156\alpha\beta^2-32\beta^3),$$
$$a_6 = 256\beta^3(-72\alpha^3+15\alpha^2\beta+120\alpha\beta^2+16\beta^3),$$
$$a_7 = 3072\alpha\beta^4(21\alpha^2-14\alpha\beta+8\beta^2).$$

Пример 4. Рассмотрим гиперэллиптическую кривую рода $g=2$:

$$w^2 = \lambda(\lambda^2+6(\alpha+\beta)\lambda+9(\alpha-\beta)^2)\times$$
$$\times(\lambda^2+4(\alpha+\beta)\lambda-48\alpha\beta), \qquad (12)$$

6-листно накрывающую эллиптическую (1).

В случае кривой (12) редуцируемый голоморфный дифференциал задается формулой

$$\omega = \frac{6\lambda+12\alpha+12\beta}{w}d\lambda,$$

а коэффициенты мероморфной функции равны

$$a_0 = \frac{-1}{2\alpha(\alpha-\beta)}, \quad a_1 = 36(\alpha+3\beta),$$
$$a_2 = 6(7\alpha^2+38\alpha\beta+83\beta^2),$$
$$a_3 = -36(\alpha+3\beta)(\alpha^2+16\alpha\beta-\beta^2),$$
$$a_4 = -864\beta(3\alpha^3+2\alpha^2\beta+7\alpha\beta^2+4\beta^3),$$
$$a_5 = 5184\beta^2(\alpha-\beta)(7\alpha^2+\beta^2),$$
$$a_6 = 0, \quad a_7 = 0.$$

Естественно, этот метод поиска редуцируемых голоморфных дифференциалов можно применять и к кривым рода $g > 2$, но с учетом того, что выражения для голоморфного дифференциала и мероморфной функции будут иметь другой, более сложный вид. Еще раз заметим, что нигде не было использовано конкретных формул связи (4) между рассмотренными гиперэллиптическими кривыми и эллиптической кривой (1). Между тем утверждение о том, что дифференциал ω удовлетворяет уравнению (6), является верным и в том случае, когда эти формулы связи известны.

Пример 5. Сделаем в уравнении эллиптической кривой (1) замену $s=w$, $t=\lambda^2+\gamma$. Тогда из уравнения (1) мы получим уравнение гиперэллиптической кривой рода $g=2$:

$$w^2 = (\lambda^2+\gamma)(\lambda^2+\gamma-\alpha)(\lambda^2+\gamma-\beta). \qquad (13)$$

Из формул связи между кривыми (1) и (13) вытекает следующее выражение для редуцируемого голоморфного дифференциала:

$$\omega = \frac{2\lambda d\lambda}{w},$$

удовлетворяющего уравнению (6) с функцией

$$\tilde{\mu} = -\frac{(\lambda^2+\gamma)^2(\lambda^2+\gamma-\beta)^2}{2\alpha(\alpha-\beta)w^3}.$$

Следовательно, интеграл по любому замкнутому контуру на кривой (13) от редуцируемого дифференциала является решением гипергеометрического уравнения (3).

Не только уравнение (3) имеет решения в виде полных эллиптических интегралов. Одним из наиболее важных свойств алгебраических кривых рода $g=2$, накрывающих эллиптическую (1), является то, что существует еще одно отображение этой кривой, но уже на другую эллиптическую кривую [4, 5]. Уравнения этих новых эллиптических кривых имеют уже совершенно другую зависимость от параметров α и β. Поэтому на гиперэллиптических кривых рода

$g=2$ существует еще один голоморфный дифференциал

$$\tilde{\omega}=\frac{d\lambda}{w}, \qquad (14)$$

интегралы от которого удовлетворяют новому уравнению класса Пикара – Фукса:

$$U_{\alpha\alpha}+P(\alpha,\beta)U_{\alpha}+Q(\alpha,\beta)U=0. \qquad (15)$$

Непосредственные вычисления дают следующие результаты.

Для интегралов от дифференциала (14) по замкнутому контуру на гиперэллиптической кривой (7) уравнение (15) имеет вид

$$U_{\alpha\alpha}+\left(\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\alpha-\beta}+\frac{2\alpha-\beta}{\alpha^2-\alpha\beta+\beta^2}\right)U_{\alpha}+$$
$$+\frac{3(3\alpha^2-3\alpha\beta+\beta^2)}{4\alpha(\alpha-\beta)(\alpha^2-\alpha\beta+\beta^2)}U=0.$$

Интегралы от дифференциала (14) по любому замкнутому контуру на гиперэллиптической кривой (10) удовлетворяют уравнению

$$U_{\alpha\alpha}+\left(\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\alpha-\beta}+\frac{3}{3\alpha+\beta}+\frac{1}{\alpha+3\beta}\right)U_{\alpha}+$$
$$+\frac{3(9\alpha^2+10\alpha\beta-3\beta^2)}{4\alpha(\alpha-\beta)(3\alpha+\beta)(\alpha+3\beta)}U=0.$$

Для случая спектральной кривой (11) интегралы от дифференциала (14) удовлетворяют уравнению

$$U_{\alpha\alpha}+\left(\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\alpha-\beta}+\frac{3(2\alpha-\beta)}{3\alpha^2-3\alpha\beta+32\beta^2}\right)U_{\alpha}+$$
$$+\frac{3(9\alpha^2-9\alpha\beta+16\beta^2)}{4\alpha(\alpha-\beta)(3\alpha^2-3\alpha\beta+32\beta^2)}U=0.$$

Уравнение, которому удовлетворяют интегралы от дифференциала (14) по замкнутому контуру на кривой (12), имеет вид

$$U_{\alpha\alpha}+\left(\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\alpha-\beta}+\frac{2(\alpha+7\beta)}{\alpha^2+14\alpha\beta+\beta^2}\right)U_{\alpha}+$$
$$+\frac{3(3\alpha^2+18\alpha\beta-5\beta^2)}{4\alpha(\alpha-\beta)(\alpha^2+14\alpha\beta+\beta^2)}U=0.$$

Очевидно, что все эти уравнения являются уравнениями Пикара – Фукса с пятью особыми точками [3], из которых три особые точки являются особыми точками гипергеометрического уравнения (1), а две точки – новые, индивидуальные для каждой отдельной кривой.

Заметим, что в отличие от этих случаев интегралы, вычисленные по замкнутым контурам на кривой (13), удовлетворяют уравнению с четырьмя особыми точками

$$U_{\alpha\alpha}+\left(\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\alpha-\beta}+\frac{1}{\alpha-\gamma}\right)U_{\alpha}+\frac{3\alpha-\beta-\gamma}{4\alpha(\alpha-\beta)(\alpha-\gamma)}U=0,$$

которое называется уравнением Гойна [1, 3].

Отметим, что уравнениям Пикара – Фукса удовлетворяют эллиптические интегралы не только от голоморфных дифференциалов. Эллиптические интегралы по замкнутым контурам от дифференциалов второго рода также являются решениями некоторых дифференциальных уравнений второго порядка с рациональными коэффициентами. Проще всего такие уравнения можно построить для интегралов $V=U_{\alpha}$. Дифференцируя (15) по α и заменяя с помощью (15) в новом уравнении функцию U, получаем следующее линейное дифференциальное уравнение второго порядка на функцию V:

$$V_{\alpha\alpha}+\tilde{P}(\alpha,\beta)V_{\alpha}+\tilde{Q}(\alpha,\beta)V=0, \qquad (16)$$

где

$$\tilde{P}(\alpha,\beta)=P(\alpha,\beta)-\frac{Q_{\alpha}(\alpha,\beta)}{Q(\alpha,\beta)},$$
$$\tilde{Q}(\alpha,\beta)=Q(\alpha,\beta)+\frac{P_{\alpha}(\alpha,\beta)Q(\alpha,\beta)-P(\alpha,\beta)Q_{\alpha}(\alpha,\beta)}{Q(\alpha,\beta)}.$$

Если функции $P(\alpha,\beta)$ и $Q(\alpha,\beta)$ рациональные, то коэффициенты уравнения (16) также будут рациональными, т. е. если уравнение (15) есть уравнение Пикара – Фукса, то уравнение (16) также будет уравнением Пикара – Фукса. Например, интегралы от эллиптического дифференциала $u_{\alpha}=t(t-\beta)dt/(2s^3)$, вычисленные вдоль любого замкнутого контура на кривой (1), удовлетворяют гипергеометрическому уравнению

$$V_{\alpha\alpha}+\left(\frac{2}{\alpha}+\frac{2}{\alpha-\beta}\right)V_{\alpha}+\frac{9}{4\alpha(\alpha-\beta)}V=0,$$

которому также удовлетворяют интегралы от дифференциалов ω_{α}, вычисленные вдоль любого замкнутого контура на кривых (7), (10)–(13). Вместе с тем интегралы от дифференциалов $\tilde{\omega}_{\alpha}$ являются решениями уравнений из класса Пикара – Фукса с большим числом особых точек, чем у уравнения (15), поскольку количество особых точек уравнения (16) увеличивается за счет нулей функции $Q(\alpha, \beta)$.

Вместе с тем совершенно не обязательно дифференцировать эллиптические интегралы, чтобы получить решение некоторого уравнения Пикара – Фукса. Для достаточно большого числа интегралов второго рода можно подобрать подходящую мероморфную функцию для выполнения равенства (2) или (6), поскольку на эллипти-

ческой кривой существуют мероморфные функции с единственными полюсами порядка $N > 1$ в точке общего положения, с единственными полюсами порядка $2N+1$ в точке ветвления, а также с двумя простыми полюсами в произвольной паре точек. Продемонстрируем справедливость данного утверждения на следующих примерах.

Пример 6. Рассмотрим на кривой (1) эллиптический дифференциал второго рода $v=(t-\gamma)\mathrm{d}t/s$ с единственным полюсом первого порядка в бесконечно удаленной точке. Нетрудно проверить, что для этого дифференциала выполняется равенство

$$v_{\alpha\alpha} + P(\alpha,\beta)v_\alpha + Q(\alpha,\beta)v = d\mu,$$

где

$$\mu = -\frac{\left(\begin{array}{c} t^2(t-\beta)^2((\alpha\beta-2\alpha\gamma+2\beta\gamma-\gamma^2)t+ \\ +4\alpha\gamma^2-3\alpha\beta\gamma-\gamma^3) \end{array}\right)}{2\alpha(\alpha-\beta)(\alpha\beta-2\alpha\gamma+\gamma^2)s^3},$$

$$P(\alpha,\beta) = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha-\beta} + \frac{2\gamma-\beta}{\alpha(\beta-2\gamma)+\gamma^2}, \qquad (17)$$

$$Q(\alpha,\beta) = -\frac{(\beta-2\gamma)\alpha+2\beta\gamma-\gamma^2}{4\alpha(\alpha-\beta)((\beta-2\gamma)\alpha+\gamma^2)}. \qquad (18)$$

Следовательно, интеграл от этого дифференциала, вычисленный вдоль произвольного замкнутого контура на эллиптической кривой (1), удовлетворяет уравнению (15) с коэффициентами (17), (18), т. е. частному случаю уравнения Гойна [1, 3]. Заметим, что полный эллиптический интеграл от данного дифференциала при $\gamma=\beta$, т. е. от $v=(t-\beta)\mathrm{d}t/s$, удовлетворяет уравнению

$$V_{\alpha\alpha} + \frac{1}{\alpha}V_\alpha - \frac{1}{4\alpha(\alpha-\beta)}V = 0.$$

Пример 7. Рассмотрим на кривой (1) эллиптический дифференциал второго рода $v=(t-\beta)^2\mathrm{d}t/s$ с единственным полюсом третьего порядка в бесконечно удаленной точке ветвления. Нетрудно убедиться, что α- и β-периоды этого дифференциала являются линейно независимыми решениями гипергеометрического уравнения

$$V_{\alpha\alpha} + \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha-\beta}\right)V_\alpha - \frac{3}{4\alpha(\alpha-\beta)}V = 0.$$

Соответствующая мероморфная функция имеет вид

$$\mu = -\frac{t^2(t-\beta)^4}{2\alpha(\alpha-\beta)s^3}.$$

Пример 8. Рассмотрим на кривой (13) эллиптический дифференциал второго рода $\omega=2t(t^2+\gamma-\delta)^2dt/w$ с двумя полюсами третьего порядка в бесконечно удаленных точках. Периоды этого дифференциала являются линейно независимыми решениями уравнения Пикара – Фукса (15) с пятью особыми точками, где

$$P(\alpha,\beta) = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha-\beta} - \frac{2(3\beta^2-8\beta\delta+8\delta^2)\alpha+10\beta\delta^2-4\beta^2\delta-12\delta^3}{(3\beta^2-8\beta\delta+8\delta^2)\alpha^2+(10\beta\delta^2-4\beta^2\delta-12\delta^3)\alpha+3\delta^4},$$

$$Q(\alpha,\beta) = \frac{\left(\begin{array}{c} 3((3\beta^2-8\beta\delta+8\delta^2)\alpha^2- \\ -2\alpha(\beta\delta^2+2\delta^3)+4\beta\delta^3-\delta^4) \end{array}\right)}{\left(\begin{array}{c} 4\alpha(\alpha-\beta)((3\beta^2-8\beta\delta+8\delta^2)\alpha^2+ \\ +(10\beta\delta^2-4\beta^2\delta-12\delta^3)\alpha+3\delta^4) \end{array}\right)}.$$

В заключение заметим, что результаты настоящей работы позволяют понять, каким именно образом Дарбу мог получать решения частных случаев уравнения Гойна в виде определенных интегралов, о чем он кратко заметил в своей работе [6]. К сожалению, найденные нами уравнения Гойна не содержат акцессорного параметра, т. е. мы еще не до конца определили тип интегралов, которые являются решениями уравнения Гойна с произвольным акцессорным параметром.

Автор благодарит компанию *Wolfram Research* и ее российское представительство за грант, предоставленный ГУАП для покупки системы аналитических вычислений *Wolfram Mathematica*, при помощи которой были осуществлены все вычисления, необходимые для представленной работы.

Библиографический список

1. *Smirnov, A. O.* Elliptic solitons and Heun's equation // CRM Proceedings and Lecture Notes. 2002. Vol. 32. P. 287–305.
2. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и таблицами / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. М.: Наука, 1979. 832 с.
3. *Славянов, С. Ю.* Специальные функции: Единая теория, основанная на анализе особенностей / С. Ю. Славянов, В. Лай. СПб.: Невский диалект, 2002. 312 с.
4. *Smirnov, A. O.* Finite-gap elliptic solutions of the KdV equation. Acta Appl. Math. 1994. Vol. 36. P. 125–166.
5. Algebro-geometrical approach to nonlinear evolution equations / E. D. Belokolos, A. I. Bobenko, V. Z. Enol'skii et al. // Springer Ser. Nonlinear Dynamics, Springer, 1994. 337 p.
6. *Darboux, G.* Sur une equation linéaire / G. Darboux // C. R. 1882. Vol. 94. N 26. P. 1645–1648.

УДК 517.957+519.688

А. О. Смирнов*
доктор физико-математических наук, доцент
Г. А. Семенов*
магистрант кафедры высшей математики и механики
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ «ВОЛН-УБИЙЦ»

В работе показывается возможность определения типа «волны-убийцы» и ее параметров по результатам обработки экспериментальных данных.

***Ключевые слова**: «волна-убийца», спектральная кривая, численные методы, Wolfram Mathematica.*

A. O. Smirnov*
PhD. Phys.-Math, Associate Professor
G. A. Semenov*
Postgraduate Student of Department of Higher Mathematics and Mechanics
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

SPECTRAL ANALYSIS OF ROGUE WAVES

The paper shows the possibility of determining the kind of the rogue wave and its parameters based on the results of experimental data processing.

***Keywords:** Rogue wave, spectral curve, numerical methods, Wolfram Mathematica.*

В настоящее время достаточно большое внимание привлекает к себе проблема «волн-убийц» (*rogue waves*), т. е. волн, которые «возникают ниоткуда и исчезают без следа» [1]. Ежегодно в международных научных журналах выходит не менее десятка статей с ключевыми словами *rogue wave*. Самой большой проблемой сегодня является невозможность предсказания появления «волны-убийцы», которая может привести к катастрофическим разрушениям. В данной работе мы предлагаем метод обработки экспериментальных данных, по которому можно при выполнении определенных условий определять в некотором смысле близость характера поведения нелинейных волн к характеру поведения «волны убийцы».

Предлагаемый нами метод основывается на следующих результатах работ [2, 3]:

1. Распространение волны описывается комплекснозначной функцией $p(x, t)$, удовлетворяющей фокусирующему нелинейному уравнению Шредингера

$$ip_t - H_2(p,-p^*) = 0. \qquad (1)$$

2. Существует бесконечная последовательность функций $H_k(p, q)$, первые члены которой равны

$$H_1(p,q) = -p_x, \quad H_2(p,q) = -p_{xx} + 2p^2 q,$$
$$H_3(p,q) = -p_{xxx} + 6pqp_x,$$
$$H_4(p,q) = -p_{xxxx} + 8pqp_{xx} + 2p^2 q_{xx} +$$
$$+6p_x^2 q + 4pp_x q_x - 6p^3 q^2.$$

3. По функциям $H_k(p, q)$ строятся функции

$$\gamma_1 = \frac{i}{2}\left(-H_1(p,-p^*) + C_1 p\right),$$
$$\gamma_j = \left(\frac{i}{2}\right)^j \times$$
$$\times\left(-H_j(p,-p^*) - \sum_{k=1}^{j-1} C_k H_{j-k}(p,-p^*) + C_j p\right), \quad j > 1,$$

где C_k – некоторые постоянные.

4. В том случае, когда функция $p(x, t)$ является n-фазным решением уравнения (1), существует такой набор постоянных C_k, что выполняются тождества

$$\gamma_j \equiv 0, \quad j > n.$$

5. В случае n-фазного решения функция

$$w(z)=\frac{Y^2}{p^2}z^2-i\frac{p_xY^2}{p^3}z-$$
$$-\frac{-4p^2p^*Y^2-2pY_{xx}Y+pY_x^2+2p_xY_xY}{4p^3}, \qquad (2)$$

где $Y(x,t,z)=pz^n+\sum_{k=1}^{n}\gamma_k z^{n-k}$, является многочленом от z степени $2n+2$ с постоянными коэффициентами, корни которого определяют тип решения уравнения (1). Заметим, что корни многочлена $w(z)$ являются точками ветвления спектральной кривой, ассоциированной с решением $p(x, t)$ уравнения (1). Поэтому чем ближе друг к другу корни многочлена $w(z)$, тем более экстремальным является поведение решения $p(x, t)$, чем дальше корни от оси действительных чисел, тем больше максимальное значение амплитуды волны.

Чтобы проверить возможность применения этого метода к экспериментальным данным, мы моделируем данные с помощью значений известных решений, вычисленных при разных значениях аргументов x и t:

$$p_{kj}=p(x_k,t_j),\ k=-N_x,...,N_x,\ j=-N_t,...,N_t,$$

и сравниваем найденные корни с эталонными, найденными в работах [2, 3].

Поскольку в процессе проверки предложенного нами метода мы имеем дело с дискретными данными, вычисленными в узлах решетки x_k, t_j, то для вычисления функций $H_m(p_{kj},-p^*_{kj})$ мы должны использовать методы численного дифференцирования. Поэтому, следуя рекомендациям учебного пособия [4], мы, используя формулы Тейлора, вывели несколько различных формул для производных, которые затем можно будет применять в зависимости от ситуации. Основные формулы численного дифференцирования мы выводили, исходя из следующих вариантов формулы Тейлора:

$$f(x+\delta)=f(x)+f'(x)\delta+f''(x)\frac{\delta^2}{2}+$$
$$+f'''(x)\frac{\delta^3}{6}+f^{IV}(x)\frac{\delta^4}{24}+\dots$$
$$f(x-\delta)=f(x)-f'(x)\delta+f''(x)\frac{\delta^2}{2}-$$
$$-f'''(x)\frac{\delta^3}{6}+f^{IV}(x)\frac{\delta^4}{24}+\dots$$
$$f(x+2\delta)=f(x)+2f'(x)\delta+4f''(x)\frac{\delta^2}{2}+$$
$$+8f'''(x)\frac{\delta^3}{6}+16f^{IV}(x)\frac{\delta^4}{24}+\dots$$
$$f(x-2\delta)=f(x)-2f'(x)\delta+4f''(x)\frac{\delta^2}{2}-$$
$$-8f'''(x)\frac{\delta^3}{6}+16f^{IV}(x)\frac{\delta^4}{24}+\dots$$
$$f(x+3\delta)=f(x)+3f'(x)\delta+9f''(x)\frac{\delta^2}{2}+$$
$$+27f'''(x)\frac{\delta^3}{6}+81f^{IV}(x)\frac{\delta^4}{24}+\dots$$
$$f(x-3\delta)=f(x)-3f'(x)\delta+9f''(x)\frac{\delta^2}{2}-$$
$$-27f'''(x)\frac{\delta^3}{6}+81f^{IV}(x)\frac{\delta^4}{24}+\dots$$
$$f(x+4\delta)=f(x)+4f'(x)\delta+16f''(x)\frac{\delta^2}{2}+$$
$$+64f'''(x)\frac{\delta^3}{6}+256f^{IV}(x)\frac{\delta^4}{24}+\dots$$

Нужную нам формулу мы получали, рассматривая совместно несколько формул Тейлора и исключая из них все производные, кроме той, которая нас интересовала.

В частности, для первой производной в зависимости от ситуации мы использовали одну из следующих формул:

$$f'(x)=\frac{\left(\begin{array}{c}45(f(x+\delta)-f(x-\delta))-9(f(x+2\delta)-\\-f(x-2\delta))+f(x+3\delta)-f(x-3\delta)\end{array}\right)}{60\delta},$$
$$f'(x)=\frac{\left(\begin{array}{c}48f(x+\delta)-36f(x+2\delta)+\\+16f(x+3\delta)-3f(x+4\delta)-25f(x\end{array}\right)}{12\delta},$$
$$f'(x)=\frac{\left(\begin{array}{c}f(x+3\delta)-6f(x+2\delta)+\\+18f(x+\delta)-10f(x)-3f(x-\delta)\end{array}\right)}{12\delta}$$

и

$$f'(x)=\frac{8(f(x+\delta)-f(x-\delta))-(f(x+2\delta)-f(x-2\delta))}{12\delta}.$$

Первая формула использовалась глубоко внутри интервала дифференцирования, вторая – на краю, третья и четвертая – в промежуточных точках.

Для тех же самых ситуаций для второй производной мы вывели следующие формулы:

$$f''(x)=(270(f(x+\delta)+f(x-\delta))-$$
$$-27(f(x+2\delta)+f(x-2\delta))+$$
$$+2(f(x+3\delta)+f(x-3\delta))-490f(x))/(180\delta^2),$$

$$f''(x)=\frac{\left(\begin{array}{c}35f(x)-104f(x+\delta)+114f(x+2\delta)-\\-56f(x+3\delta)+11f(x+4\delta)\end{array}\right)}{12\delta^2},$$

$$f''(x)=\frac{\left(\begin{array}{c}11f(x-\delta)+6f(x+\delta)+\\+4f(x+2\delta)-f(x+3\delta)-20f(x)\end{array}\right)}{12\delta^2}$$

и

$$f''(x)=\frac{\left(\begin{array}{c}16(f(x+\delta)+f(x-\delta))-\\-(f(x+2\delta)+f(x-2\delta))-30f(x)\end{array}\right)}{12\delta^2}.$$

Третью производную мы вычисляли по формулам

$$f'''(x)=\frac{\left(\begin{array}{c}18f(x+\delta)-24f(x+2\delta)+\\+14f(x+3\delta)-3f(x+4\delta)-5f(x)\end{array}\right)}{2\delta^3},$$

$$f'''(x)=\frac{\left(\begin{array}{c}(f(x-3\delta)-f(x+3\delta))-8(f(x-2\delta)-\\-f(x+2\delta))+13(f(x-\delta)-f(x+\delta))\end{array}\right)}{8\delta^3},$$

$$f'''(x)=\frac{\left(\begin{array}{c}10f(x)+6f(x+2\delta)-12f(x+\delta)-\\-3f(x-\delta)-f(x+3\delta)\end{array}\right)}{2\delta^3}$$

и

$$f'''(x)=\frac{(f(x+2\delta)-f(x-2\delta))-2(f(x+\delta)-f(x-\delta))}{2\delta^3}.$$

Использованные нами формулы для вычисления четвертой производной имеют вид

$$f^{IV}(x)=(12(f(x+2\delta)+f(x-2\delta))-$$
$$-39(f(x+\delta)+f(x-\delta))-$$
$$-(f(x+3\delta)+f(x-3\delta))+56f(x))/(6\delta^4),$$

$$f^{IV}(x)=\frac{\left(\begin{array}{c}f(x)-4f(x+\delta)+6f(x+2\delta)-\\-4f(x+3\delta)+f(x+4\delta)\end{array}\right)}{\delta^4},$$

$$f^{IV}(x)=\frac{\left(\begin{array}{c}f(x+3\delta)-4f(x+2\delta)+\\+6f(x+\delta)-4f(x)+f(x-\delta)\end{array}\right)}{\delta^4}$$

и

$$f^{IV}(x)=\frac{\left(\begin{array}{c}6f(x)-4(f(x+\delta)+f(x-\delta))+\\+(f(x+2\delta)+f(x-2\delta))\end{array}\right)}{\delta^4}.$$

Ключевой проблемой предложенного нами метода является поиск постоянных C_k, при которых функции $H_m(p_{kj},-p_{kj}^*)$ будут линейно зависимыми при всех значениях x_k и t_j. Для решения данной проблемы мы использовали процедуру ортогонализации функций $H_m(p_{kj},-p_{kj}^*)$ относительно скалярного произведения

$$<f_{kj},g_{kj}>=\sum_{k,j}f_{kj}g_{kj}^*.$$

По функциям H_m строятся функции G_m:

$$G_0=p,\ G_1=H_1-c_{10}G_0,\ G_2=H_2-c_{21}G_1-c_{20}G_0,$$
$$G_3=H_3-c_{32}G_2-c_{31}G_1-c_{30}G_0,$$
$$G_4=H_4-c_{43}G_3-c_{42}G_2-c_{41}G_1-c_{40}G_0,\ldots$$

где $c_{jk}=<H_j,G_k>/<G_k,G_k>$.

В случае n-фазного решения функция $G_{n+1}\equiv 0$. Соответственно, $<G_{n+1},G_{n+1}>=0$ и процедура ортогонализации на этом заканчивается, т. е. функции G_{n+k} далее не вычисляются. Из приведенных формул следует, что постоянные C_k могут быть найдены из равенства

$$\gamma_{n+1}=-\left(\frac{i}{2}\right)^{n+1}G_{n+1}.$$

Первые несколько функций G_m имеют вид

$$G_1=H_1-c_{10}p,\ G_2=H_2-c_{21}H_1+(c_{21}c_{10}-c_{20})p,$$
$$G_3=H_3-c_{32}H_2+(c_{32}c_{21}-c_{31})H_1-$$
$$-(c_{32}c_{21}c_{10}-c_{31}c_{10}+c_{30})p,\ldots$$

В том случае, когда функция $p(x, t)$ является однофазным решением нелинейного уравнения Шредингера (1), выполняется равенство

$$\gamma_2=\frac{1}{4}G_2=\frac{1}{4}(H_2+C_1H_1-C_2p)\equiv 0.$$

Следовательно, в случае однофазного решения постоянные C_k равны

$$C_1=-c_{21},\quad C_2=c_{20}-c_{21}c_{10}.$$

Подставляя функцию $Y=pz+\gamma_1$, где $\gamma_1=\frac{i}{2}(-H_1+C_1p)$, в уравнение (2), получаем

$$w=z^4+\sum_{k=1}^{4}s_kz^{4-k},$$

где

$$s_1=\frac{2\gamma_1-ip_x}{p},$$

$$s_2=-\frac{4p^3q-4\gamma_1^2+8i\gamma_1p_x+3p_x^2-2pp_{xx}}{4p^2},$$

$$s_3 = -\frac{\left(\begin{array}{c} 4p^3 q\gamma_1 + 2i\gamma_1^2 p_x + \gamma_1 p_x^2 + \\ +2pp_x(\gamma_1)_x - \gamma_1 pp_{xx} - p^2(\gamma_1)_{xx} \end{array}\right)}{2p^3},$$

$$s_4 = -\frac{4p^2 q\gamma_1^2 + 2\gamma_1(\gamma_1)_x p_x + p(\gamma_1)_x^2 - 2p\gamma_1(\gamma_1)_{xx}}{4p^3}.$$

Если же функция $p(x, t)$ является двухфазным решением нелинейного уравнения Шредингера, то

$$\gamma_3 = \frac{i}{8}G_2 = \frac{i}{8}(H_3 + C_1 H_2 + C_2 H_1 - C_3 p) \equiv 0,$$

где

$$C_1 = -c_{32}, \quad C_2 = c_{32}c_{21} - c_{31},$$
$$C_3 = c_{32}c_{21}c_{10} - c_{31}c_{10} + c_{30}.$$

Подставляя функцию

$$Y = pz^2 + \gamma_1 z + \gamma_2,$$

где $\gamma_1 = \frac{i}{2}(-H_1 + C_1 p)$, $\gamma_2 = -\frac{1}{4}(-H_2 - C_1 H_1 + C_2 p)$,

в уравнение (2), получаем

$$w = z^6 + \sum_{k=1}^{6} s_k z^{6-k},$$

где

$$s_1 = \frac{2\gamma_1 - ip_x}{p},$$

$$s_2 = -\frac{4p^3 q - 4\gamma_1^2 - 8p\gamma_2 + 8i\gamma_1 p_x + 3p_x^2 - 2pp_{xx}}{4p^2},$$

$$s_3 = -\frac{\left(\begin{array}{c} 4p^3 q\gamma_1 - 4p\gamma_1\gamma_2 + 2i\gamma_1^2 p_x + 4i\gamma_2 pp_x + \\ +\gamma_1 p_x^2 + 2pp_x(\gamma_1)_x - \gamma_1 pp_{xx} - p^2(\gamma_1)_{xx} \end{array}\right)}{2p^3},$$

$$s_4 = -(4p^2 q\gamma_1^2 + 8p^3 q\gamma_2 - 4p\gamma_2^2 + 8i\gamma_1\gamma_2 p_x +$$
$$+2\gamma_2 p_x^2 + 2\gamma_1(\gamma_1)_x p_x + p(\gamma_1)_x^2 + 4pp_x(\gamma_2)_x -$$
$$-2\gamma_2 pp_{xx} - 2p\gamma_1(\gamma_1)_{xx} - 2p^2(\gamma_2)_{xx}) / (4p^3),$$

$$s_5 = -(4p^2 q\gamma_1\gamma_2 + 2i\gamma_2^2 p_x + \gamma_2(\gamma_1)_x p_x + \gamma_1(\gamma_2)_x p_x +$$
$$+ p(\gamma_1)_x(\gamma_2)_x - p\gamma_2(\gamma_1)_{xx} - \gamma_1(\gamma_2)_{xx}) / (2p^3),$$

$$s_6 = -\frac{\left(\begin{array}{c} 4p^2 q\gamma_2^2 + 2\gamma_2(\gamma_2)_x p_x + \\ +p(\gamma_2)_x^2 - 2p\gamma_2(\gamma_2)_{xx} \end{array}\right)}{4p^3}.$$

Заметим, что постоянные s_m для любого многофазного решения в случае численного моделирования надо находить усреднением значений соответствующих выражений по всем xk и tj.

Пример 1. Возьмем решение уравнения (1) в виде солитона

$$p(x,t) = \frac{2a\exp\{i\omega t - ikx\}}{\cosh(X)},$$

где $k = 2b$, $\omega = 4(a^2 - b^2)$, $X = 2a + 8abt$.

Положим $a = 0{,}8$, $b = 0{,}2$, рассмотрим решение на области $-2 \le t \le 2$, $-8 \le x \le 8$ и возьмем $N_t = 250$ и $N_x = 500$.

Подстановка значений в численный вариант левой части уравнения (1) после усреднения дает значение, равное почти нулю:

$$5{,}23798 \times 10^{-11} + 3{,}87234 \times 10^{-17} i \pm 9{,}23018 \times 10^{-9},$$

что указывает на правильно выбранные формулы для численного дифференцирования.

В процессе ортогонализации функций H_m получаем следующие значения для квадратов норм функций G_m:

$$< G_0, G_0 >= 100\,200,$$
$$< G_1, G_1 >= 85\,504,$$
$$< G_2, G_2 >= 6{,}83579 \times 10^{-14}.$$

Следовательно, применение нашего метода приводит нас к выводу, что рассмотренные числовые данные принадлежат однофазному решению.

Вычисляя постоянные C_k и s_k, получаем следующие значения:

$$C_1 = 3{,}93951 \times 10^{-15} + 0{,}8i,$$
$$C_2 = -2{,}72 - 2{,}83790 \times 10^{-15} i,$$
$$s_1 = -0{,}8 + 3{,}93951 \times 10^{-15} i,$$
$$s_2 = 1{,}52 - 2{,}75415 \times 10^{-15} i,$$
$$s_3 = -0{,}544 - 2{,}64917 \times 10^{-14} i,$$
$$s_4 = 0{,}4624 - 9{,}40613 \times 10^{-15} i.$$

Находя корни многочлена (2), имеем

$$z_1 = 0{,}19922903974423395 + 0{,}8005545636233088i,$$
$$z_2 = 0{,}19922903975565276 - 0{,}8005545636241448i,$$
$$z_3 = 0{,}20077096024759025 - 0{,}7994458031424788i,$$
$$z_4 = 0{,}20077096025900643 + 0{,}7994458031433466i,$$

анализируя которые, видим, что многочлен $w(z)$ имеет два двукратных корня, расположенных в точках $z = b \pm ia$ (см. рис. 1). Из результатов ра-

бот [4, 5] следует, что искомое решение – солитон с параметрами $a=0{,}8$ и $b=0{,}2$.

Пример 2. Возьмем решение уравнения (1) в виде солитона Перегрина

$$p(x,t)=a\left(\frac{4(1+iT)}{1+X^2+T^2}-1\right)\exp\{i\omega t-ikx\},$$

где $k=2b$, $\omega=2(a^2-2b^2)$, $X=2a+8abt$.

Положим $a=0{,}7$, $b=1{,}1$, рассмотрим решение на области $-2\le t\le 2$, $-8\le x\le 8$ и возьмем $N_t=250$ и $N_x=500$.

Подстановка значений в численный вариант левой части уравнения (1) после усреднения дает значение, равное почти нулю:

$$2{,}82375\times10^{-8}+1{,}49801\times10^{-16}i\pm0{,}000006,$$

что указывает на то, что исследуемые данные соответствуют некоторому решению уравнения (1).

В процессе ортогонализации функций H_{m} получаем следующие значения для квадратов норм функций G_m:

$$<G_0,G_0>=260858,$$

$$<G_1,G_1>=65437{,}1,$$

$$<G_2,G_2>=193601,$$

$$<G_3,G_3>=0{,}41730.$$

Вычисляя среднее значение G_3, получаем

$$G_3=-1{,}64830\times10^{-13}-0{,}000001i\pm0{,}000912.$$

Отсюда следует, что рассматриваемые числовые данные принадлежат двухфазному решению и что точность проводимых вычислений далека от идеальной.

Вычисляя постоянные C_k и s_k, получаем следующие значения:

$$C_1=-3{,}84536\times10^{-15}+6{,}6i,$$

$$C_2=-17{,}46012-7{,}3154\times10^{-14}i,$$

$$C_3=1{,}89875\times10^{-13}-39{,}87212i,$$

$$s_1=-6{,}6-3{,}84536\times10^{-15}i,$$

$$s_2=19{,}62013+4{,}92667\times10^{-14}i,$$

$$s_3=-33{,}08836-2{,}23885\times10^{-13}i,$$

$$s_4=33{,}35456-2{,}75539\times10^{-12}i.$$

$$s_5=-19{,}07457+1{,}96424\times10^{-10}i,$$

$$s_6=4{,}91332-2{,}56705\times10^{-10}i.$$

Находя корни многочлена (2), получаем

$$z_1=1{,}0730098792761218-0{,}6962668819537031i,$$
$$z_2=1{,}0730098793336196+0{,}6962669291553832i,$$
$$z_3=1{,}1097293137843145-0{,}7243238173252408i,$$
$$z_4=1{,}1097293549624614+0{,}7243237942408335i,$$
$$z_5=1{,}1172726389923169+0{,}679483404485627i,$$
$$z_6=1{,}117272680137646-0{,}6794834286107257i.$$

Анализ найденных корней многочлена $w(z)$ показывает (рис. 2), что этот многочлен с боль-

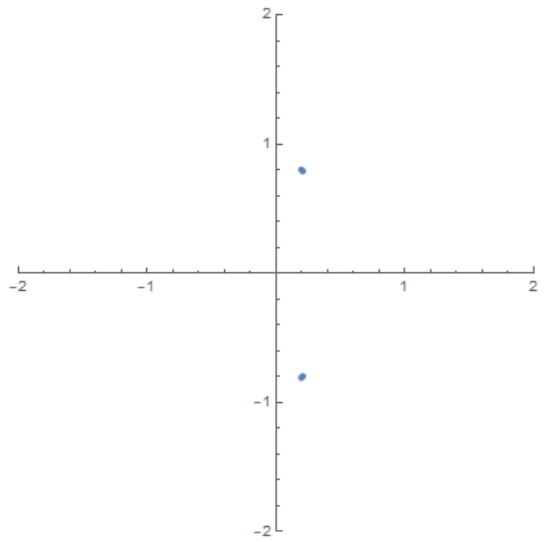


Рис. 1. Корни многочлена w(z) для солитона (пример 1)

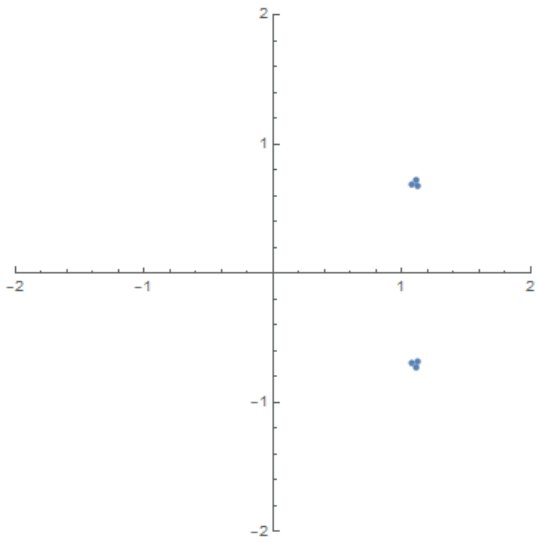


Рис. 2. Корни многочлена w(z) для солитона Перегрина (пример 2)

шой вероятностью имеет два трехкратных корня $z = b \pm ia$, где $b = 1{,}1$, $a = 0{,}7$. Из результатов работ [2, 3] следует, что искомое решение уравнения (1) – это солитон Перегрина с данными параметрами.

Рассмотренные нами примеры показывают, что предложенный в настоящей работе метод определения типа нелинейной волны и ее параметров по ее значениям, вычисленным в ряд последовательных моментов времени t_j в различных точках x_k, работает с достаточно хорошей точностью и может быть предложен к использованию для обработки экспериментальных данных. Автоматизация данного метода позволит регулярно анализировать поведение корней многочлена $w(z)$ и предупреждать о возможности появления экстремальной волны, называемой «волной-убийцей».

Авторы благодарят компанию *Wolfram Research* за предоставление гранта на покупку лицензионного программного обеспечения *Wolfram Mathematica*, при помощи которого были осуществлены все вычисления, представленные в настоящей работе.

Библиографический список

1. *Akhmediev, N.* Waves that appear from nowhere and disappear without a trace / N. Akhmediev, A. Ankiewicz, M. Taki // Phys. Lett. A, 2009. Vol. 373, P. 675–678.
2. *Смирнов, А. О.* Спектральные кривые «странных волн» / А. О. Смирнов, Ю. А. Гусман, В. Б. Матвеев // СПб.: ГУАП, 2017. С. 53–62.
3. *Smirnov, A. O.* Spectral curves for the freak waves / A. O. Smirnov, Yu. A. Gusman, V. B. Matveev, N. V. Landa // Preprint. arXiv: 1712.0930, 2017. 15 p.
4. *Вержбицкий, В. М.* Численные методы (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения): учеб. пособие для вузов. М.: ОНИКС 21 век, 2005. 400 с.

УДК 573.2:519.7

А. В. Копыльцов
доктор технических наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СО СТРУКТУРИРОВАННОЙ СРЕДОЙ

В статье рассмотрена математическая модель взаимодействия электромагнитного излучения со структурированной средой, представляющей собой кремниевую пластинку с нанесенным на ее поверхности барельефом в виде круговых канавок шириной 0,2 мкм и глубиной 0,6 мкм. Результат взаимодействия зависит как от падающего излучения (частоты излучения, количества, мощности и расположения источников излучения), так и от свойств кремниевой пластинки.

В качестве источников излучения рассматривались как отдельные источники, так и плоскости и сферы различного диаметра. При облучении пластинки электромагнитным излучением предполагается, что на поверхности резонатора происходит отражение, а в канавках – поглощение. Кроме того, на узких канавках учитывается явление дифракции. Расчеты на компьютере показали, что пластинка преобразует падающее излучение в некоторое конечное число периодических излучений определенной частоты. Показано, что такие пластинки могут быть использованы при защите от электромагнитного излучения широкого диапазона частот.

***Ключевые слова**: математическая модель, электромагнитное излучение, кремниевая пластинка, напряженность электрического поля.*

A. V. Kopyltsov
PhD. Tech., Professor
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

MATHEMATICAL MODELING OF MOVEMENT CHARGED ERYTHROCYTE ALONG NARROW CAPYLLARY

The mathematical model of the interaction of electromagnetic radiation with a structured medium is considered. It is a silicon plate with a bas-relief on its surface in the form of circular grooves 0.2 μm wide and 0.6 μm deep. The result of the interaction depends both on the incident radiation (the radiation frequency, the number, power and location of the radiation sources), and the properties of the silicon wafer. As sources of radiation were considered as separate sources, and planes and spheres of various diameters. When the plate is irradiated with electromagnetic radiation, it is assumed that reflection occurs on the surface of the resonator, and absorption of radiation in the grooves. In addition, the phenomenon of diffraction is taken into account on narrow grooves. Calculations on the computer showed that the plate converts the incident radiation into a finite number of periodic emissions of a certain frequency, and therefore such plates can be used to protect against electromagnetic radiation of a wide frequency range.

***Keywords:** mathematical model; electromagnetic radiation, silicon plate, electric field strength.*

Введение

Результат взаимодействия электромагнитного излучения со структурированной средой зависит от многих факторов. В первую очередь от характеристик излучения (частоты излучения, количества, мощности и расположения источников излучения) и свойств структурированной среды. В качестве источников излучения рассматривались единичные источники в количестве от одного до нескольких сотен, плоскости и сферы различного диаметра. В качестве струк-

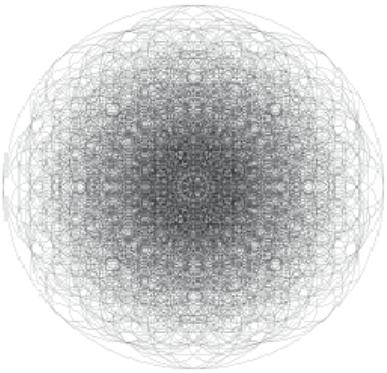


Рис. 1. Кремниевая пластинка с барельефом

турированной среды рассматривались кремниевые пластинки с барельефом, нанесенным методом травления, представляющим собой круговые канавки шириной 0,2 мкм и глубиной 0,6 мкм (рис. 1) [1–2].

При облучении пластинки-резонатора электромагнитным излучением на различных частотах предполагается, что на поверхности резонатора происходит отражение, а в канавках – поглощение излучения. Кроме того, на узких канавках учитывается явление дифракции. При облучении лабораторных мышей электромагнитным излучением на разных частотах отмечено, что при частоте 2,4 ГГц (частоте работы мобильных телефонов) влияние электромагнитного облучения снижается при присутствии пластинок-резонаторов [3]. Построим математическую модель и дадим объяснения полученным экспериментальным данным.

Математическая модель

При облучении резонатора электромагнитным полем слабосвязанные внешние электроны атомов пластинки-резонатора смещаются и генерируют поле в окружающей среде. Поэтому электрическое поле, исходящее от резонатора, является суперпозицией полей падающей волны и поля, испускаемого внешними электронами, т. е.

$$E = E_0 \cos\theta + \Delta E_0 \cos(\theta - \frac{\pi}{2}),$$

где

$$\theta = \omega(t - \frac{z}{c}),\ \Delta E_0 = \frac{2\pi k_0 n_e e^2 \omega}{c m_e(\omega_0^2 - \omega^2)} E_0 \Delta z,$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{4\pi k_0 e\rho}{m_e}}$$

– частота колебаний электрона в равномерно заряженной пластинке, n_e – концентрация электронов, $\rho = n_e e$ – заряд единичного объема пластины, e – заряд электрона, m_e – масса электрона, Δz – толщина пластины, c – скорость света, $k_0 = 9 \cdot 10^9$ Н·м^2/Кл^2 [4].

Напряженность E электрического поля удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = D_3 \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} \right),$$

где x, y, z – декартовые координаты, t – время, D_3 – коэффициент.

Поскольку на пластинке резонатора есть узкие щели, то необходимо учитывать дифракцию. Тогда

$$\frac{I_\beta}{I_0} = \frac{\sin^2(\frac{\pi b}{\lambda}\sin\beta)}{(\frac{\pi b}{\lambda}\sin\beta)^2},$$

где I_β и I_0 – интенсивность волн, распространяющихся под углом β и $\beta = 0$ к нормали пластинки, λ – длина волны, b – ширина щели.

Так как интенсивность распространяющейся волны пропорциональна квадрату амплитуды [4], то

$$\frac{I_\beta}{I_0} = \frac{{E_\beta}^2}{{E_0}^2}.$$

Таким образом, в итоге имеем

$$E = E_{otr} + E_{ele} + E_{dif},$$

где E_{otr}, E_{ele}, E_{dif} – напряженность электрического поля за счет отражения, свободных электронов и дифракции.

Закон сохранения для электронов можно записать в виде

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = q - (\frac{\partial V_e n_e}{\partial x} + \frac{\partial V_e n_e}{\partial y} + \frac{\partial V_e n_e}{\partial z}) +$$

$$+ D_e(\frac{\partial^2 n_e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n_e}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 n_e}{\partial z^2}) - b_e n_e,$$

$$V_e = \mu_e E,$$

где μ_e – подвижность электронов, E – напряженность электрического поля, n_e – концентрация свободных электронов, V_e – вектор скорости активного транспорта электронов, D_e – коэффициент диффузии электронов, q – скорость появления свободных электронов, b_e – коэффициент.

Если известна величина силы света I, то можно определить освещенность плоскости точечным источником

$$J = \frac{I\cos\alpha}{r^2},$$

где r – расстояние от источника до плоскости, α – угол между нормалью к плоскости и направлением светового потока [4].

Приведенная система уравнений решалась численными методами на компьютере при различных граничных и начальных условиях: стоки (или их отсутствие) в центре и/или на краях пластинки резонатора. Решая систему уравнений, можно найти распределения n_e (в пластинке резонатора), E (в пространстве) и J (на плоскости).

Результаты и их обсуждение

Для расчетов использовали пластинку диаметром 7,5 см с шириной канавок 0,2 мкм и глубиной 0,6 мкм. Расчеты были проведены на кластере высокопроизводительных параллельных вычислений в кубе со стороной равной 267 и шагом 28,1 мкм. Предполагалось, что в центре пластинки-резонатора и на ее краях стока нет.

При облучении пластинки-резонатора электромагнитным излучением с частотой 2,4 ГГц над центральной частью пластинки на расстоянии 28,1 мкм от пластинки формируется несколько периодических откликов на различных частотах. Так, при шаге по времени 1 с имеем отклик с частотой 2,5 МГц (рис. 2). При шаге равном 10^{-6} с имеем отклик с частотой 8,3 ТГц, а при шаге 10^{-10} с – 115 ПГц. Таким образом, пластинка-резонатор преобразует падающее электромагнитное излучение с определенной частотой (2,4 ГГц) в электромагнитное излучение нескольких дискретных частот.

Известно, что различные структуры живого организма чувствительны к определенным частотам излучения. Резонансные частоты некоторых структур были определены экспериментально. Так, соматическая клетка имеет резонансную частоту $2{,}39 \cdot 10^{12}$ Гц, ядро соматической клетки – $9{,}55 \cdot 10^{12}$ Гц, митохондрии из клетки печени – $3{,}18 \cdot 10^{13}$ Гц, геном клетки человека – $2{,}5 \cdot 10^{13}$ Гц, хромосома интерфазная – $7{,}5 \cdot 10^{11}$ Гц, хромосома метафазная – $1{,}5 \cdot 10^{13}$ Гц, ДНК – $(2\ldots9) \cdot 10^{9}$ Гц, нуклеосома – $4{,}5 \cdot 10^{15}$ Гц, рибосомы – $2{,}65 \cdot 10^{15}$ Гц, клеточные мембраны – $5 \cdot 10^{10}$ Гц, цитоскелет – 10^{8} Гц, эритроциты – $(3{,}5\ldots4{,}0) \cdot 10^{10}$ Гц [5]. Таким образом, пластинка-резонатор преобразует частоты, которые могут быть близки к резонансным частотам, в набор других частот, причем энергия каждой из них существенно меньше энергии облучения.

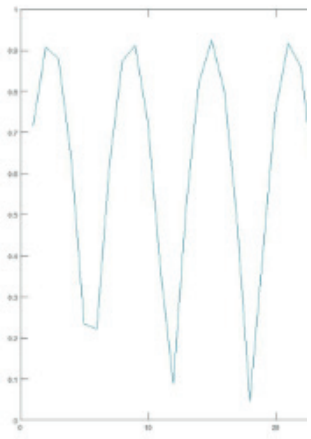


Рис. 2. Изменение напряженности H (ось ординат, В/м) над центральной частью резонатора с течением времени t (ось абсцисс, с)

Заключение

Таким образом, при построении математической модели взаимодействия электромагнитного излучения определенной частоты с пластинкой-резонатором было установлено, что пластинка преобразует падающее излучение в некоторое конечное число периодических излучений определенной частоты.

Поскольку различные органы живого организма чувствительны к различным частотам облучения, то можно сказать, что пластинка-резонатор преобразует вредное падающее излучение в набор других излучений, которые могут оказаться менее вредными, чем падающее излучение, что подтверждается экспериментами на лабораторных мышах линии Вистар. Таким образом, пластинки-резонаторы могут быть использованы при защите от электромагнитного излучения широкого диапазона частот.

Библиографический список

1. *Копыльцов, А. В.* Математическое моделирование взаимодействия электромагнитного излучения с кремниевой самоаффинной поверхностью / А. В. Копыльцов, И. Н. Серов, Г. Н. Лукьянов // Вестник ИНЖЭКОНА, 2007. С. 199–205.
2. *Kopyltsov, A.* Modelling of the interaction between electromagnetic radiation and semiconductor silicon surface having affine relief / A. Kopyltsov, G. Lukyanov, I. Serov // HoloExpo-2007. Moscow. P. 143–146.
3. Действие электромагнитного излучения высокой частоты и влияние резонаторов-преобразователей на частоту хромосомных аберраций в клетках костного мозга самцов крыс линии Вистар / Н. А. Дюжикова, А. В. Копыльцов, К. А. Коршунов, Г. Н. Лукьянов, В. А. Пучкова, И. Н. Серов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2018. Т. 23. № 1. С. 12–18.
4. *Орир, Дж.* Физика. М.: Мир, 1981. 624 с.
5. *Нефёдов, Е. И.* Взаимодействия физических полей с биологическими объектами / Е. И. Нефёдов, А. А. Яшин. Тула: КУРС, 2017. 344 с.

УДК 621.372

М. В. Макарова
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Ю. П. Петров
доктор технических наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный университет

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗАВАРИЙНОЙ РАБОТЫ ОБЪЕКТОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Изучается вопрос влияния малых изменений параметров на безаварийную работу объектов. Даются рекомендации по построению математических моделей. Приводится методика оценки допустимых вариаций параметров.

***Ключевые слова**: математическое моделирование, параметр системы, вариация, расчет надежности, устойчивость.*

M. V. Makarova
PhD. Tech., Associate Professor
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
Yu. P. Petrov
PhD. Tech., Professor
Saint-Petersburg State University

MATHEMATICAL MODELING OF TROUBLE-FREE OPERATION OF DESIGN OBJECTS

Examines the impact of small changes in accident-free work sites. Provides recommendations for building mathematical models. Provides a method of estimation of allowable variation of parameters.

***Keywords:** mathematical modelling, system setting, variation, computation of reliability, sustainability.*

Одной из наиболее существенных причин аварийности различных систем и устройств являются неизбежные малые отклонения реальных параметров систем и устройств от их расчетных значений.

Эти малые отклонения возникают по двум основным причинам:

1) параметры только что изготовленного изделия немного отличаются от расчетных значений уже потому, что идеальная точность изготовления недостижима;

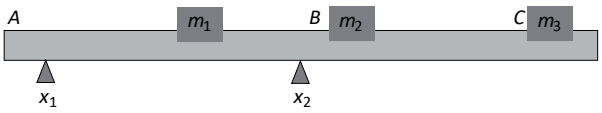
2) в ходе эксплуатации изделия его параметры почти всегда изменяются из-за трения, износа и т. п.

Расхождения между величинами параметров только что изготовленного и реально работающего изделия чаще всего постепенно нарастают с течением времени, что и приводит к авариям.

Для предотвращения аварий необходимо еще на стадии проектирования разрабатывать такие системы и устройства, которые были бы малочувствительны к неизбежным малым отклонениям реальных значений параметров от расчетных. Эти малые отклонения часто для краткости называют вариациями параметров.

Если в какой-либо системе или устройстве имеется только небольшое число параметров, вариации которых могут привести к авариям, то можно воспользоваться хорошо разработанными методами теории чувствительности, подробно описанными в работах Р. М. Юсупова [1], Е. Н. Розенвассера [2] и др. К сожалению, в большинстве реальных систем и устройств параметров, которые могут привести к неожиданным авариям, достаточно много, и для предотвращения аварий необходимо разрабатывать новые методы исследования и расчета.

Теоретические основы этих новых методов, позволяющих предотвращать аварии в доста-



Модель системы балка – груз

точно сложных системах, изложены в монографии [3] и более подробно в работе автора [4].

Рассмотрим простую систему, изображенную на рисунке. Это балка AC с длиной L, лежащая на двух неудерживаемых опорах и нагруженная тремя грузами m_1, m_2, m_3. Нагрузки на опоры от грузов и веса балки обозначим через x_1 (левая опора) и x_2 (правая опора).

Мы выбрали столь простую систему, потому что здесь все однозначно: ясно видно, когда система (балка и грузы) будет лежать на опорах устойчиво, а когда потеряет устойчивость и упадет. Упадет она тогда, когда центр масс этой системы окажется правее точки B, лежащей над правой опорой.

Если центр масс системы лежит левее правой опоры, но близко к ней, то балка лежит устойчиво, хотя может потерять устойчивость, соскользнуть и упасть при малых изменениях (вариациях) параметров системы.

Отметим, что вариации делятся на положительные (тот или другой параметр возрастает) и отрицательные (параметр убывает).

1. Положительные вариации длины балки уменьшают запас устойчивости, поскольку центр масс однородной балки при положительной вариации сдвигается вправо. Отрицательная вариация параметра L запас прочности увеличивает.

2. Положительная вариация параметра $L{\cdot}q$ увеличивает запас устойчивости системы в том случае, если центр масс балки лежит левее правой опоры и уменьшает запас устойчивости, если центр масс балки лежит правее ее.

3. Увеличение веса груза m_1, расположенного левее правой опоры, (т. е. положительная вариация параметра m_1) увеличивает запас устойчивости.

4. Положительная вариация параметра m_2 (т. е. груза, расположенного правее правой опоры) уменьшает запас устойчивости системы.

Рассмотренный простой пример позволяет сделать важные выводы общего характера:

1) положительная и отрицательная вариации могут в разных условиях как увеличивать, так и уменьшать вероятность аварии;

2) наиболее опасным является некоторое сочетание положительных и отрицательных вариаций различных параметров;

3) найти это сочетание нелегко, поскольку число всех возможных сочетаний положительных и отрицательных вариаций и параметров равно, как известно, 2^n и очень быстро растет с ростом n.

Так, для рассмотренной нами простейшей системы (см. рисунок) $n=10$, тогда число возможных сочетаний положительных и отрицательных вариаций равно $2^{10}=1024$. А для немного более сложной системы, состоящей из двух балок, подобных показанной на рисунке, с условием, что левый конец второй балки соединен с правым концом первой, будет уже 20. Тогда число возможных сочетаний положительных и отрицательных вариаций достигнет $2^{20}=1\,048\,576$, т. е. больше миллиона.

Поэтому наиболее простой путь учета влияния вариаций параметров – повторение расчета для всех возможных сочетаний положительных и отрицательных вариаций – чаще всего неосуществим и требует более совершенных методов расчета, позволяющих коренным образом сократить объем необходимых вычислений.

Математическим аппаратом, позволяющим производить расчеты самых различных систем и устройств в статике, когда нет необходимости учитывать силы инерции движущихся элементов, является теория систем линейных алгебраических уравнений, т. е. систем вида

$$\left.\begin{array}{c} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots a_{1n}x_n = b_1 \\ \cdots\ \cdots\ \cdots\ \cdots \\ a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \cdots a_{nn}x_n = b_n \end{array}\right\}, \qquad (1)$$

которые записывают чаще всего в векторно-матричной форме:

$$\mathbf{A}{\cdot}\mathbf{X}=\mathbf{B}, \qquad (2)$$

где $\mathbf{X}$ – вектор интересующих нас величин (решений системы уравнений (2)); $\mathbf{A}$ – квадратная матрица $n{\times}n$ коэффициентов системы; $\mathbf{B}$ – вектор-столбец правых частей. Матрица коэффициентов отражает внутренние свойства системы, вектор $\mathbf{B}$ элементов правых частей отражает влияние внешних сил. Коэффициенты матрицы $\mathbf{A}$ в уравнении (2) связаны с параметрами исследуемой системы. К сожалению, эта связь часто оказывается достаточно сложной. Изменение какого-либо одного параметра, например, на 10% может изменить сразу несколько коэффициентов матрицы $\mathbf{A}$ в уравнении (2), причем изменить совершенно по-разному.

Поэтому прежде чем приступить к использованию математического аппарата теории алгебраических уравнений, нужно предварительно исследовать взаимосвязь коэффициентов (и их вариаций) матрицы $\mathbf{A}$ с параметрами (и их ва-

риациями) реальных объектов. Только после такого исследования можно приступать к решению столь часто используемых систем алгебраических уравнений.

Так, например, для нагруженной балки (см. рисунок) нетрудно составить систему уравнений для вычисления нагрузок на опоры, сил x_1 и x_2. Достаточно составить уравнение равновесия моментов сил относительно левого и правого концов балки. Для левого конца имеем:

$$l_{x_1} \cdot x_1 + l_{x_2} \cdot x_2 = \\ = L \cdot q \cdot \frac{L}{2} + l_{m_1} \cdot m_1 + l_{m_2} \cdot m_2 + l_{m_3} \cdot m_3, \qquad (3)$$

где l_{x_1} и l_{x_2} – это расстояние от левой и правой опор до левого конца балки, L – длина балки, q – вес единицы длины балки, l_{m_1}, l_{m_2} и l_{m_3} – это расстояния центров масс грузов m_1, m_2, m_3 от левого конца балки.

Составив аналогичное уравнение равновесия моментов для правого конца, получим систему двух уравнений для вычисления нагрузок на опоры x_1 и x_2. Исследуя полученную систему при различных численных значениях параметров l_{x_1}; l_{x_2}; L; q; l_{m_1}; l_{m_2}; l_{m_3}; m_1; m_2; m_3, можно проверить степень влияния вариаций каждого из параметров и каждого из коэффициентов полученной системы уравнений на их решения, т. е. на величины x_1 и x_2.

Правые части системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) отражают, как известно, влияние на исследуемую систему и решения СЛАУ внешних сил, внешних воздействий.

Для исследования влияния вариаций правых частей на решения воспользуемся известными формулами Крамера для решений x_1; x_2; ... x_n систем вида (1). Решение x_n равно дроби, знаменателем которой является определитель матрицы **A** (det**A**), а числителем – тот же определитель, в котором κ-й столбец заменен на столбец коэффициентов правой части.

Так, для решения x_1 имеет место формула

$$x_1 = \frac{\begin{vmatrix} b_1 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ b_2 & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ b_n & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix}}. \qquad (4)$$

Аналогично можно вывести формулы для x_2; x_3; ... x_n.

Воспользуемся также известной формулой разложения определителя по алгебраическим дополнениям любого столбца. Так, например, определитель, стоящий в числителе формулы (4), может быть представлен в виде

$$\begin{vmatrix} b_1 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ b_2 & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ b_n & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = \\ = b_1 A_{11} + b_2 A_{21} + \ldots + b_n A_{n1}, \qquad (5)$$

где A_{11}; A_{21};...; A_{n1} – алгебраические дополнения элементов первого столбца определителя (5).

Рассмотрим теперь, как изменится определитель (5), если все коэффициенты правой части b_1; b_2; ...; b_n получат малые вариации q_1; q_2; ...; q_n. Определитель (5) примет вид

$$\begin{vmatrix} b_1 + q_1 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ b_2 + q_2 & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ b_n + q_n & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{vmatrix} = \\ b_1 A_{11} + b_2 A_{21} + \ldots + b_n A_{n1} + \\ + q_1 A_{11} + q_2 A_{21} + \ldots + q_n A_{n1}. \qquad (6)$$

В формуле (6) в верхней строчке стоит исходное значение определителя при вариациях элементов первого столбца (т. е. при вариациях правых частей системы уравнений (1), равных нулю, а в нижней строчке стоит величина изменения определителя Δq, порожденная вариациями величин b_1; b_2; ...; b_n).

Теперь, опираясь на формулы Крамера (4), нетрудно вычислить и изменение величины решения x_1 системы уравнений (1) при вариации ее правой части. Это изменение (обозначим его Δx_1) равно

$$\Delta x_1 = \frac{1}{\det A} \cdot (q_1 A_{11} + q_2 A_{21} + \ldots + q_n A_{n1}). \qquad (7)$$

Формулы, аналогичные формуле (7), справедливы и для других решений x_2; x_3;...; x_n системы уравнений (1) – просто вместо алгебраических уравнений элементов первого столбца определителя матрицы **A** в формуле для изменения решения x_2, аналогичной формуле (7), будут стоять алгебраические дополнения второго столбца; в формуле для расчета изменения решения x_κ будут стоять алгебраические дополнения элементов κ-го столбца.

Если мы рассматриваем относительные вариации правых частей системы уравнений (1), когда вместо величин b_1; b_2; ...; b_n появляются величины $b_1+\varepsilon_1 b_1$; $b_2+\varepsilon_2 b_2$; …; $b_n+\varepsilon_n b_n$, то сохраняются формулы, аналогичные формуле (7), но с заменой величин q_1; q_2; ...; q_n на $\varepsilon_1 b_1$; $\varepsilon_2 b_2$; …; $\varepsilon_n b_n$. Так, формула для вычисления вариации решения x_2, порожденной вариациями правых частей, принимает вид

$$\Delta x_2 = \frac{1}{\det A}\cdot(\varepsilon_1 b_1 A_{12} + \varepsilon_2 b_2 A_{22} + \ldots + \varepsilon_n b_n A_{n2}). \quad (8)$$

Отметим теперь, что оценить наибольшие возможные абсолютные величины вариаций q_1; q_2; ...; q_n и ε_1; ε_2; …; ε_n сравнительно нетрудно, но знак этих вариаций чаще всего непредсказуем. Поэтому для оценки очень важной величины – наибольшей возможной вариации какого-либо из решений $x_к$ системы уравнений (1) – следует использовать абсолютные величины произведений вариации правых частей на их алгебраические дополнения.

Анализ формул (7) и (8) сразу показывает, что, например, для решения x_1 и вариаций правых частей q_1; q_2; ...; q_n наибольшая возможная вариация x будет равна

$$\Delta x_{1\max} = \frac{1}{\det A}\times$$
$$\times\left(\left|q_{1m}A_{11}\right| + \left|q_{2m}A_{21}\right| + \ldots + \left|q_{nm}A_{n1}\right|\right), \quad (9)$$

где в прямых скобках стоят абсолютные величины (модули) соответствующих произведений. Для решения x_2 на основе формулы (8) нетрудно установить, что

$$\Delta x_{2\max} = \frac{1}{\det A}\times$$
$$\times\left(\left|\varepsilon_{1m}b_1A_{12}\right| + \left|\varepsilon_{2m}b_2A_{22}\right| + \ldots + \left|\varepsilon_{nm}b_nA_{n2}\right|\right). \quad (10)$$

Аналогичные формулы для вычисления наибольших возможных вариаций каждого из решений x_1; x_2; ...; x_n системы (1), порожденных вариациями величин q_1; q_2; ...; q_n или ε_1; ε_2; …; ε_n, читатель может легко выписать самостоятельно.

Сопоставление верхней и нижней строчек формулы (6) и их сопоставление с формулами (9) и (10) показывает, что даже при малых вариациях правых частей, при малых q_i и ε_i по сравнению с коэффициентами a_{ij} и b_i системы (1) наибольшая возможная вариация любого из решений x_1; x_2; ...; x_n системы может оказаться больше самого решения и привести к неожиданной аварии.

Причина возможной аварии заключается в том, что знаки вариаций правых частей и знаки их алгебраических дополнений A_{ij} могут оказаться такими, что некоторые из решений могут оказаться малой разницей больших чисел. В то же время в наибольшую возможную вариацию любого решения x_1; x_2; ...; x_n входят, как показывают формулы (9) и (10), только положительные члены. Поэтому их сумма в зависимости от соотношения знаков вариаций правых частей и их алгебраических дополнений вполне может оказаться больше любого из x_1; x_2; ...; x_n.

Это обстоятельство влечет за собой очень неприятное следствие в проблеме аварийности объектов, математическими моделями которых являются СЛАУ. И таких объектов оказывается очень много.

К сожалению, даже длительная успешная и безаварийная работа объекта сама по себе не гарантирует, что в любой из дней не произойдет неожиданной аварии. Ее возможная причина: до поры до времени знаки неизбежных малых вариаций различных параметров объекта были таковы, что влияние разных вариаций не суммировалось. Но знаки малых вариаций переменны во времени, и в тот момент, когда они начинают суммироваться, может произойти самая неприятная авария.

Опасное сочетание знаков вариаций является событием с малой вероятностью, поэтому аварий, происходящих по этой причине, не может быть слишком много. Но считаться с возможностью подобных аварий нужно, зато предотвращать их на стадии проектирования и расчета очень легко: достаточно вычислить не только решения x_1; x_2; ...; x_n системы уравнений, описывающих объект (это и сейчас делается), но и вычислить по формулам (9), (10) и им подобным для других x_i величины наибольшей возможной вариации решений.

Если для всех решений оказывается, что $\Delta x_{i\max}$ много меньше, чем само x_i, то аварий, порожденных малыми вариациями коэффициентов математической модели, а значит, и малыми вариациями реальных параметров объекта, не произойдет. Если x_i и $\Delta x_{i\max}$ соизмеримы, то нужно таким образом изменить параметры объекта, чтобы для всех решений $\Delta x_{i\max}$ было меньше x_i. Тогда из-за вариаций параметров объекта аварий не будет.

Пример. Рассмотрим систему уравнений:

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 + 3x_3 = 7 \\ 2x_1 + x_2 + 3x_3 = 8, \\ 3x_3 + x_2 + 2x_1 = 9 \end{cases} \quad (11)$$

у которой вектор правой части может испытывать вариации, с учетом которых $b_1=7+q_1$, $b_2=8+q_2$, $b_3=9+q_3$.

Определитель матрицы **A** у системы (11) – он же определитель знаменателя в формулах Крамера – равен

$$\begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \end{vmatrix} = 6. \qquad (12)$$

Определитель числителя формул Крамера для вычисления решения x_1 равен

$$\begin{vmatrix} 7 & 2 & 3 \\ 8 & 1 & 3 \\ 9 & 1 & 2 \end{vmatrix} = 7\cdot A_{11} + 8\cdot A_{12} + 9\cdot A_{13}. \qquad (13)$$

Разлагаем по элементам первого столбца. A_{11}, A_{12}, A_{13} – алгебраические дополнения этих элементов, т. е.

$$A_{11} = \begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 1 & 2 \end{vmatrix} = -1, \quad A_{12} = -\begin{vmatrix} 2 & 3 \\ 1 & 2 \end{vmatrix} = 1,$$

$$A_{13} = \begin{vmatrix} 2 & 3 \\ 1 & 3 \end{vmatrix} = 3\ . \qquad (14)$$

Используя формулы (4) и (6), получаем:

$$x_1 = \frac{1}{6}\left(7\cdot(-1) - 8\cdot 1 + 9\cdot 3 + (-1)q_1 + q_2 + 3q_3\right) = \\ = 2 - q_1 + q_2 + 3q_3. \qquad (15)$$

Если величины q_1; q_2; q_3 по абсолютной величине не превышают, например, 0,1, то наибольшая величина вариации решения x_1 в сторону возрастания будет в том случае, когда q_1 будет отрицательным, $q_1=0{,}1$, а q_2 и q_3 – положительными, вариация в сторону убывания будет наибольшей при обратных знаках q_1; q_2; q_3. Окончательно имеем: $x_1=2\pm 0{,}5$.

Наиболее сложной задачей является расчет поведения исследуемого объекта, описываемого системой уравнений (1) при учете вариаций не только правых частей, но и коэффициентов матрицы **A**, т. е. вариаций параметров самого объекта.

Если математическая модель объекта состоит из n уравнений вида (1), то она содержит n^2+n коэффициентов a_{ij} и b_i, вариации которых необходимо учитывать, и число возможных сочетаний положительных и отрицательных вариаций, которое равно 2^{n^2+n}. Уже при $n=10$ это число равно 2^{110}, что больше, чем 10^{30}. В то же время для каждого сочетания положительных и отрицательных вариаций коэффициентов (даже если по абсолютной величине эти вариации равны) величина вариаций решений системы уравнений может быть различной. Поэтому прямой расчет интересующих нас вариаций решений системы уравнений при учете вариаций ее коэффициентов невыполним даже при использовании самых быстродействующих вычислительных машин.

Однако можно средствами дифференциального исчисления найти наиболее опасные, максимально возможные вариации решений. Первым шагом является отыскание наибольших и наименьших значений определителя при вариациях его коэффициентов. Рассмотрим определитель

$$\det A = \begin{vmatrix} a_{11}+q_{11} & a_{12}+q_{12} & \cdots & a_{1n}+q_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1}+q_{n1} & a_{n2}+q_{n2} & \cdots & a_{nn}+q_{nn} \end{vmatrix}, \qquad (16)$$

каждый из элементов которого может испытывать вариации q_{ij}. Будем рассматривать каждую из вариаций q_{ij} как некую переменную величину.

Рассмотрим определитель, например, по элементам первой строки, пользуясь известной теоремой Лапласа:

$$\det A = (a_{11}+q_{11})A_{11} + \\ +(a_{12}+q_{12})A_{12} + \ldots + (a_{1n}+q_{1n})A_{1n}, \qquad (17)$$

и возьмем частную производную, например, по переменной q_{12}. Получим

$$\frac{\partial \det A}{\partial q_{12}} = A_{12}, \qquad (18)$$

поскольку во все другие члены разложения (17) переменная q_{12} не входит. Из формулы (18) сразу следует, что при возрастании вариации q_{12} определитель (16) будет возрастать, если $A_{12}>0$, и будет убывать, если $A_{12}<0$.

Повторяя то же доказательство для остальных вариаций q_{ij}, получим выражение для первого дифференциала определителя (16), т. е. для главной линейной части его приращения

$$d\det A = A_{11}dq_{11} + A_{12}dq_{12} + \ldots + A_{nn}dq_{nn} \qquad (19)$$

(всего n^2 членов), где dq_{ij} – дифференциал переменной q_{ij} (всего n^2 дифференциалов).

Из формулы (19) следует, что определитель (16) будет возрастать всего быстрее, если знаки дифференциалов dq_{ij} будут совпадать со знаками алгебраических дополнений A_{ij}, и будут убывать быстрее всего, если эти знаки противоположны.

Немного сложнее рассчитывается изменение определителя, если его вариации выражены в долях от каждого из коэффициентов, и с учетом их вариаций определитель принимает вид

$$\det A = \begin{vmatrix} a_{11}+\varepsilon_{11}a_{11} & a_{12}+\varepsilon_{12}a_{12} & \cdots & a_{1n}+\varepsilon_{1n}a_{1n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1}+\varepsilon_{n1}a_{n1} & a_{n2}+\varepsilon_{n2}a_{n2} & \cdots & a_{nn}+\varepsilon_{nn}a_{nn} \end{vmatrix}. \quad (20)$$

Повторяя выкладки для определителя (16), приведшие нас к таблице алгебраических дополнений и к таблице знаков, получим, что определитель (20) будет возрастать с наибольшей скоростью в том случае, если знак переменной величины ε_{ij} будет совпадать со знаком произведения каждого из элементов a_{ij} на его алгебраическое дополнение.

Если у исследуемого определителя все элементы положительны, то таблица знаков будет совпадать с таблицей знаков определителя вида (16).

Пользуясь таблицей знаков, нетрудно вычислить наибольшие возможные изменения определителя и в сторону возрастания, и в сторону убывания при вариациях его элементов.

Еще более интересный и более сложный случай возникает тогда, когда некоторые из алгебраических дополнений не равны нулю, но настолько малы, что при малых (но конечных) вариациях элементов определителя эти алгебраические дополнения меняют знак и тем самым изменяют и таблицы знаков.

В монографии [4] даны правила вычисления вариаций определителя в этом особом случае и показано, что поскольку при малых алгебраических дополнениях их влияние на величину определителя невелико, то с хорошей точностью можно пренебречь возможным изменением знака алгебраического дополнения и строки таблицы знаков по исходным значениям элементов определителя.

Исследование зависимости вариации величины определителя от вариаций его элементов позволяет легко перейти к вычислению изменения решений x_1; x_2;..., x_n СЛАУ при вариациях коэффициентов уравнений.

Основой являются формулы Крамера (4). Очевидно, что, например, изменение дроби (4) в направлении возрастания будет наибольшим в том случае, если числитель дроби как можно более возрастет, а знаменатель – уменьшится. Однако определители, стоящие в числителе и знаменателе дроби (4), отличаются лишь одним столбцом, и, следовательно, их вариации зависимы.

Поэтому для вычисления величины наибольшего возможного возрастания решения x_1 (и аналогично для всех остальных решений x_2; x_3;...; x_n) в формулах (4) используем два варианта расчета.

Первый вариант

За основу берется знаменатель. На первом шаге вычисляется обратная таблица знаков знаменателя и на ее основе с учетом оценки наибольших абсолютных величин вариаций коэффициентов знаменателя вычисляем его наименьшее возможное значение.

На втором этапе расчета стараемся вычислить наибольшее возможное значение числителя. Для этого вычисляем его прямую таблицу знаков. Однако в числителе формулы (4) все элементы всех столбцов кроме первого совпадают с аналогичными элементами знаменателя. Поэтому из вычисленной прямой таблицы знаков используем только первый столбец (второй, третий и т.д. столбцы используем при вычислении вариаций решений x_2; x_3;...; x_n), а во все остальные столбцы числителя записываем знаки, взятые из обратной таблицы знаков знаменателя. После этого вычисляем с учетом вариаций знаменатель, числитель и их частное, равное x_1. Затем аналогичные вычисления проводим для x_2; x_3;...; x_n.

Пример. Рассмотрим простую систему уравнений

$$\begin{cases} 2x_1 - x_2 = 1 \\ x_1 + x_2 = 2 \end{cases}. \quad (21)$$

По формулам Крамера имеем

$$x_1 = \frac{\begin{vmatrix} 1 & -1 \\ 2 & +1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 2 & -1 \\ 1 & +1 \end{vmatrix}} = \frac{3}{3} = 1. \quad (22)$$

Вычислим наибольшее возможное изменение x_1 в предположении, что все вариации коэффициентов системы (21) по абсолютной величине равны одной сотой доле самих коэффициентов. Для знаменателя его обратная таблица знаков имеет вид

$$\begin{vmatrix} - & + \\ - & - \end{vmatrix}, \quad (23)$$

и после вариаций своих элементов знаменатель равен (здесь и далее с точностью до третьего знака):

$$\begin{vmatrix} 1{,}98 & -1{,}01 \\ 0{,}99 & 0{,}99 \end{vmatrix} = 2{,}96. \quad (24)$$

Для числителя – формулы (22) – прямая таблица знаков имеет вид

$$\begin{vmatrix} + & - \\ - & + \end{vmatrix}, \qquad (25)$$

но мы из нее используем только первый столбец, а во второй столбец мы обязаны подставить знаки второго столбца обратной таблицы знаков знаменателя. Окончательно таблица знаков принимает вид

$$\begin{vmatrix} + & + \\ - & - \end{vmatrix}. \qquad (26)$$

А сам числитель после вариации его элементов равен

$$\begin{vmatrix} 1{,}01 & -1{,}01 \\ 1{,}98 & 0{,}99 \end{vmatrix} = 3{,}00. \qquad (27)$$

Тогда

$$x_1 = \frac{3{,}00}{2{,}96} = 1{,}013.$$

Второй вариант

Во втором варианте расчета за основу берется числитель. Для него составляется полная прямая таблица знаков. Для знаменателя вычисляется обратная таблица знаков, но из нее используется только один столбец, соответствующий тому решению x_i, которое в данный момент вычисляется. Для x_1 это первый столбец, для x_2 – второй и т.д. Во все остальные столбцы знаменателя вписываются знаки прямой таблицы знаков числителя.

Для уже рассмотренного примера системы уравнений (21) имеем для числителя таблицу знаков

$$\begin{vmatrix} + & - \\ + & + \end{vmatrix}. \qquad (28)$$

А сам числитель после вариаций его элементов будет равен

$$\begin{vmatrix} 1{,}01 & -0{,}99 \\ 2{,}02 & 1{,}01 \end{vmatrix} = 3{,}02. \qquad (29)$$

Для знаменателя таблица знаков получит вид

$$\begin{vmatrix} - & - \\ - & + \end{vmatrix}. \qquad (30)$$

Сам знаменатель после вариации его элементов будет равен

$$\begin{vmatrix} 1{,}98 & -0{,}99 \\ 0{,}99 & 1{,}01 \end{vmatrix} = 2{,}98. \qquad (31)$$

Тогда получаем

$$x_1 = \frac{3{,}02}{2{,}98} = 1{,}013.$$

В данном случае разница в величине x_1 при первом и втором варианте расчета очень мала.

Библиографический список

1. *Юсупов, Р. М.* Теория чувствительности и ее применения / Р. М. Юсупов, Ю. Н. Кофанов. М.: АН СССР, 1981. 192 с.
2. *Петров, Ю. П.* Как получить надежные решения систем уравнений. СПб.: БХВ Петербург, 2009. 175 с.
3. *Розенвассер, Е. Н.* Чувствительность систем управления / Е. Н. Розенвассер, Р. М. Юсупов. М.: Наука, 1981. 464 с.
4. *Петров, Ю. П.* Введение в теорию интервальных расчетов, учитывающую вариации параметров исследуемых объектов / Ю. П. Петров, И. А. Петров. СПб.: БХВ Петербург, 2014. 272 с.

УДК 621.822-752.3

О. В. Опалихина
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТКАЗОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

В статье рассматривается математическая модель технического состояния механической системы. Приводится методика оценки уровня вибрации, основанная на нелинейной обработке информационных параметров.

***Ключевые слова**: математическая модель технического состояния механической системы, нелинейное преобразование информационного сигнала, быстрое преобразование Фурье, окно Хэмминга.*

O. V. Opalikhina
PhD. Tech., Associate Professor
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

INVESTIGATION OF FUNCTIONAL FAILURES OF THE CONTROL SYSTEM

The mathematical model of technical condition of mechanical system is considered in the article. The method of estimation of a level of vibration, based on nonlinear processing of information parameters is given.

***Keywords:** mathematical model technical condition of mechanical system, nonlinear conversion information signal, fast Fourier transform, Hamming window.*

Практика испытаний и эксплуатации аэрокосмических изделий показала, что причиной более 80% внезапных функциональных отказов многих типов механических систем являются локальные дефекты контактирующих поверхностей и технологические погрешности наиболее ответственных элементов. Поэтому исследование причин их возникновения, а также физических процессов, происходящих в контактной зоне, имеет большое значение.

Рассмотрим влияние локальных дефектов и технологических погрешностей наиболее ответственных элементов механических систем на внезапные функциональные отказы. Объектом исследования является рулевой агрегат управления (РАУ). Он состоит из следующих основных узлов: электродвигателя (ЭД) (1), работающего в режиме реверса; упругой муфты (2); передаточного механизма (редуктора) (3); самотормозящейся винтовой пары типа винт – гайка с однозаходной трапецеидальной резьбой (4) (рис. 1). Редуктор РАУ содержит две пары шестерен (прямозубых цилиндрических зубчатых колес Z_1Z_2, Z_3Z_4).

Передаточное отношение редуктора РАУ равно $U \approx 2{,}62$. Его можно реализовать как

$$U_{\text{ср}} = \frac{z_2 z_4}{z_1 z_3} = \frac{r_2 r_4}{r_1 r_3},$$

где z_1, z_2, z_3, z_4 – числа зубьев зубчатых колес; r_1, r_2, r_3, r_4 – радиусы делительных окружностей зубчатых колес. Данная формула справедлива для идеального механизма, в котором линия зацепления сохраняет постоянное положение относительно центров вращения колес. В реальном механизме линия действия непрерывно меняет свое положение в зависимости от значения и характера технологических погрешностей сопряженных профилей.

Мгновенное передаточное отношение реального редуктора определяется по выражению

$$U_{\text{мгн}} = \frac{r_{2\text{р}} r_{4\text{р}}}{r_{1\text{р}} r_{3\text{р}}} = \frac{(r_2 + \delta_{r2})(r_4 + \delta_{r4})}{(r_1 + \delta_{r1})(r_3 + \delta_{r3})},$$

где $r_{1\text{р}}$, $r_{2\text{р}}$, $r_{3\text{р}}$, $r_{4\text{р}}$ – радиусы делительных окружностей реальных зубчатых колес; r_1, r_2, r_3, r_4 – радиусы делительных окружностей иде-

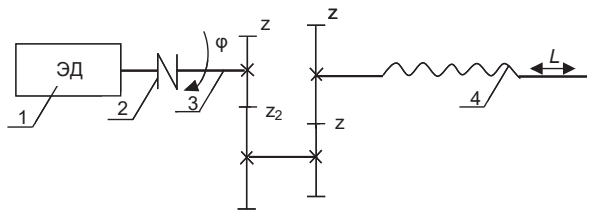


Рис. 1. Кинематическая схема механизма РАУ

альных зубчатых колес (теоретические значения радиусов); δ_{r1}, δ_{r2}, δ_{r3}, δ_{r4} – мгновенные изменения теоретических значений радиусов, определяемые технологическими погрешностями (мгновенные плечи). Постоянство мгновенного передаточного отношения ($U_{мгн}$=const) – одно из основных условий работы редуктора РАУ.

Самотормозящаяся винтовая пара преобразует угловое перемещение двигателя $\varphi_{дв}$ в линейное перемещение штока L.

Средняя скорость перемещения штока РАУ $V_{ср}$ равна

$$V_{ср} = \frac{L_c}{t},$$

где L_c – максимальный ход штока при сдвиге проводки управления, мм; t – время хода штока. $V_{ср}$ может быть в пределах: 55–120 мм/с для РАУ-Т (по каналам тангажа и крена); 70–120 мм/с для РАУ-Р (по каналу рыскания).

Результаты испытаний и экспериментальных исследований показали, что наименее надежные элементы РАУ – это шарикоподшипники двигателя и две шарикоподшипниковые опоры штока, предназначенные для его центрирования и перемещения, а также первая пара зубчатых колес Z_1Z_2 редуктора. Локальные дефекты различных форм и сочетаний этих элементов могут привести к внезапным отказам руля направления и стабилизатора автопилота. Внезапный отказ автопилота может послужить причиной аварии самолета. Результаты экспериментальных исследований показали, что на возникновение и развитие локальных дефектов элементов механических систем оказывают влияние технологические погрешности изготовления и сборки. Технологические погрешности обуславливают перераспределение деформации в зонах контакта деталей, что приводит к появлению дополнительных динамических нагрузок, вызванных этим перераспределением. Изменение деформации связано с изменением жесткости элементов механической системы [1, 2].

В процессе эксплуатации на тела качения шарикоподшипников будет действовать динамическая нагрузка Q_{qi}

$$Q_{qi}=[B(\delta_{qi})^{3/2}e(\delta_{qi})-N]e[B(\delta_{qi})^{3/2}e(\delta_{qi})-N], \quad (1)$$

где B – конструктивный параметр; δ_{qi} – обобщенный параметр деформации,

$$\delta_{qi} = \delta_{q0i} + \sum_{p=1}^{5} x_p\alpha_{ip} - \sum_{q=1}^{2}\delta_{rq} + \delta_{\alpha i},$$

здесь δ_{q0i} – статическая деформация тел качения, x_p – координаты вектора вибрации подвижного кольца, δ_{rq}, $\delta_{\alpha i}$ – составляющие деформации, возникающие вследствие вибрации, которые характеризуют технологические погрешности q-го кольца и i-го шарика, α_{ip} – коэффициент, учитывающий угловые положения контактирующих элементов; $e(\delta_{qi}) = \begin{cases} 1, \delta_{qi} > 0 \\ 0, \delta_{qi} \le 0 \end{cases}$ – функция, определяющая характер контактирования шариков с кольцами, i – номер шарика; N – несущая способность смазывающего слоя.

Амплитуду возмущающего воздействия F_{jqk} в j-м направлении от технологической погрешности k-й формы на q-м кольце подшипника можно определить как $F_{jqk}=MX_{j1}\theta_q^2$, где j – направление возмущения (j=1 – осевое, j=2,3 – радиальное); θ_q – частота возмущающих сил (частота изменения жесткости подшипника), q – номер кольца (q=1 – наружное кольцо, q=2 – внутреннее кольцо), $\theta_1=z\omega_c=z2\pi f_c$, $\theta_2=z(\omega_{вр}-\omega_c)=z2\pi(f_{вр}-f_c)$, здесь z – число шариков в подшипнике, $\omega_{вр}$, $f_{вр}$ – частота вращения вала редуктора (ротора двигателя), ω_c, f_c – частота вращения сепаратора; X_{j1} – амплитуда статических перемещений наружного кольца подшипника в j-м направлении; M – присоединительная масса вибрирующего кольца.

Результаты расчетов показали, что на частотах вращения вала $f_{вр}$ до 1200 Гц и частотах вращения сепаратора f_c от 18 до 425 Гц (θ_1 меняется от 792 до 18 692 рад/с) дополнительные динамические нагрузки, порождаемые технологическими погрешностями, незначительны и не могут вызвать колебания основания (рис. 2).

Величина F_{jqk} меняется от 0,043 Н (на частотах f_c=18 Гц, $f_{вр}$=50 Гц) до 26,2 Н (на частотах f_c=425 Гц, $f_{вр}$=1200 Гц). Однако при наличии концентраторов напряжений на отдельных участках контактирующих поверхностей, создающих условия неравномерного износа, в процессе эксплуатации может произойти увеличение дополнительных динамических нагрузок, что может создать условия для формирования локальных дефектов.

Динамическая нагрузка, действующая в контакте q-го зуба шестерни Z_1 и i-го зуба колеса Z_2, также рассчитывается по формуле (1).

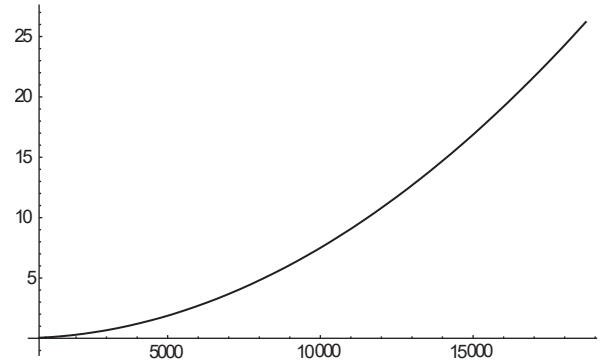


Рис. 2. Дополнительные динамические нагрузки, создаваемые технологическими погрешностями

В этом случае под обобщенным параметром деформации δ_{qi} будем понимать деформацию, возникающую в контакте q-го зуба шестерни Z_1 и i-го зуба колеса Z_2, а функция $e(\delta_{qi}) = \begin{cases} 1, \delta_{qi} > 0 \\ 0, \delta_{qi} \le 0 \end{cases}$ определяет характер контактирования зубьев сопрягаемых колес $z_1 z_2$ редуктора.

Локальный дефект подшипника и зубчатого колеса, исходя из его плавно-дискретной структуры, можно представить следующей аппроксимирующей функцией (рис. 3, *а*, *б*) [3–6]:

$$B(\varphi) = \sum_{j=n}^{m} B_j (1 - \cos(j\varphi - j\Delta\varphi_j)), \qquad (2)$$

где B_j – амплитуда составляющей от воздействия локального дефекта на данной гармонике, $\Delta\varphi_j$ – ее начальная фаза; φ – фазовый угол, определяющий пространственное положение дефекта; j – номер гармоники.

Математическое моделирование в пакетах Matlab и *Wolfram Mathematica* показало, что при $j > 17$ информационный сигнал от локального дефекта воспринимается как шум. Поэтому границей распознавания дефекта служит 17-я гармоника.

Глубина дефекта h_j определяется по формуле $h_j = B_j(1 - \cos\varphi_{\max})$, где $\varphi_{\max}$ – угол, при котором функция $B(\varphi)$, описывающая дефект, достигает максимума (рис. 3, *б*). Глубина дефекта на 17-й гармонике $h_j = 0{,}722497722$ мк.

Для подшипников качения ширина локального дефекта a на 17-й гармонике рассчитывается по формуле

$$a = \frac{2\pi R_{\text{ш}}}{17},$$

где $R_{\text{ш}}$ – радиус шарика, $a = 293{,}643$ мк для подшипника серии 6023Е.

Техническое состояние подшипниковых узлов и зубчатых колес можно определить, измерив вибрацию механической системы на информационных частотах [1, 2]. При раковине на наружном кольце информационная частота подшипника равна $f_{\text{н}} = \theta_1 = z\omega_{\text{с}} = z2\pi f_{\text{с}}$, а при раковине на внутреннем кольце – $f_{\text{в}} = \theta_2 = z(\omega_{\text{вр}} - \omega_{\text{с}}) = z2\pi(f_{\text{вр}} - f_{\text{с}})$. Информационные частоты локальных дефектов редукторов определяются по формулам $f_{\text{р}} = kf_{\text{вр}i}$, $f_z = kf_{zi}$, где $f_{\text{р}}$ – информационная частота локальных дефектов малой и большой шестерни; $f_{\text{вр}i}$ – частота вращения i-го вала редуктора; f_{zi} – зубцовая частота i-й шестерни; $k = 1, 2, 3 \ldots$ – кратность.

Определяющее влияние на вибрационные свойства подшипников оказывают виброперемещения вращающихся колец, вызываемые технологическими погрешностями и локальными дефектами, а также остаточным дисбалансом. На динамическое состояние зубчатого зацепления влияют ошибки зацепления, переменные жесткости зацепления, а также удары при входе зубьев в зацепление. Функция ошибки заце-

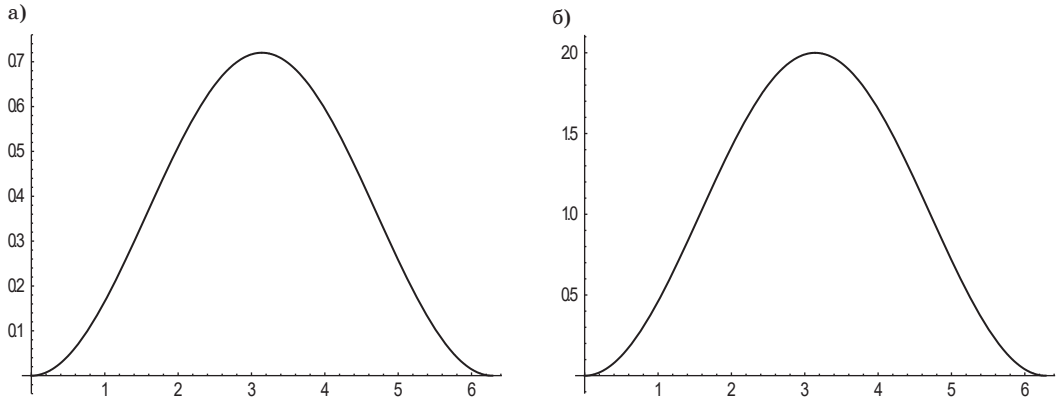


Рис. 3. Локальный дефект с плавно-дискретной структурой: а – амплитуда $B_j = 0{,}361248861$; б – амплитуда $B_j = 1$

пления является функцией технологических погрешностей изготовления профилей шестерни и колеса. Ошибки изготовления зубчатых колес создают дополнительные динамически нагрузки, которые изменяют жесткость зацепления. Жесткость зацепления также меняется в процессе пересопряжения зубьев. К соударениям при входе зубьев в зацепление приводят ошибки основного шага и деформации зубьев. Все перечисленные факторы необходимо учесть при составлении динамической модели редуктора.

В качестве контролируемого параметра, характеризующего изменение технического состояния подшипников электродвигателя, редуктора и штока, выберем комплексный параметр Δ – смещение центра вращающегося внутреннего кольца подшипника. Параметр Δ определяется по формуле

$$\Delta = \frac{\Delta_з + \Delta_н}{2} + \delta(F_р) + \delta(F_{дб}) + \delta(F_т) + \\ + \delta(F_н) + \delta(F_{вн}) + \Delta r_в, \quad (3)$$

где $\Delta_з$ – радиальный зазор; $\Delta_н$ – изменение натяга; $\delta(F_р)$, $\delta(F_{дб})$, $\delta(F_т)$, $\delta(F_н)$, $\delta(F_{вн})$ – контактные деформации, определяемые весом ротора двигателя РАУ, силой дисбаланса, мгновенными динамическими нагрузками от технологических погрешностей, остаточными внутренними напряжениями и внешними нагрузками соответственно; $\Delta r_в$ – изменение радиуса внутреннего кольца подшипника.

Колебания вращающихся колец можно описать системой дифференциальных уравнений второго порядка, которые для удобства дальнейшей обработки в пакетах Matlab и *Wolfram Mathematica* представляются в матричной форме [7]

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + (\mathbf{P} + \mathbf{G})\dot{\mathbf{x}} + \left(\mathbf{C}_0 + \sum_{p=1}^{n} \mathbf{C}_p \cos\theta_p \mathbf{t}\right)\mathbf{x} = \mathbf{F}(t),$$

где $\mathbf{M}$, $\mathbf{P}$, $\mathbf{G}$, $\mathbf{C_0}$, $\mathbf{C}_p$ – матрицы инерционных, демпфирующих, гироскопических и упругих свойств шарикоподшипников; $\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \ddot{\mathbf{x}}$ – векторы виброперемещений, виброскоростей и виброускорений (линейные и угловые колебания рассматриваются раздельно); $\mathbf{F}(t)$ – вектор возмущающих сил.

Выразим возмущающие силы, определяющие вибрацию по j-й оси, через информационный параметр Δ и свяжем его с величиной виброперемещения. Используя формулу Герца – Беляева, запишем

$$F_{\sum j} = \sum_{p,q}\left(F_m^c \cos(\omega_j t) + F_m^s \sin(\omega_j t)\right) = \\ = B\delta_{qi}^{3/2} e(\delta_{qi})\cos(\omega_j t), \quad (4)$$

где ω_j – круговая частота спектрального представления возмущающей силы.

При наличии локального дефекта максимальное суммарное воздействие в зоне i-го шарика $F_{\sum i\max}$ равно

$$F_{\sum i\max} = (F_р + F_т + F_{дб} + F_н + F_{вн})K(\tau), \quad (5)$$

где $F_р$, $F_т$, $F_{дб}$, $F_н$, $F_{вн}$ – составляющие воздействия, определяемые весом ротора двигателя РАУ, мгновенными динамическими нагрузками от технологических погрешностей, силой дисбаланса, остаточными внутренними напряжениями и внешними нагрузками соответственно; $K(\tau)$ – коэффициент, учитывающий технологическую наследственность, определяет историю изменения поверхностного слоя материала, τ – предыдущий момент времени, $\tau \in (-\infty, t)$.

Соответствующее $F_{\sum i\max}$ значение контактной деформации $\delta_{qi\max}$ определяется по выражению

$$\delta_{qi\max} = (\delta(F_р) + \delta(F_{дб}) + \delta(F_т) + \\ + \delta(F_н) + \delta(F_{вн}) + \Delta r_в)_{\max}. \quad (6)$$

Тогда, используя формулу (3), можно записать

$$\Delta_{\max} = \frac{\Delta_з + \Delta_н}{2} + \delta_{qi\max},$$

где $\Delta_{\max}$ – максимальное смещение центра вращающегося внутреннего кольца подшипника.

Подставив в формулу (4) выражения (5), (6), получим

$$F_{\sum j} = BK(\tau)\left(\Delta_{\max} - \frac{\Delta_з + \Delta_н}{2}\right)^{3/2} e(\delta_{qi})\cos(\omega_j t).$$

Тогда виброперемещение $X(\omega_j, t)$ в j-м направлении при наличии локального дефекта равно

$$X(\omega_j, t) = BK(\tau)W(\omega_j t) \times \\ \times\left(\Delta_{\max} - \frac{\Delta_з + \Delta_н}{2}\right)^{3/2} e(\delta_{qi})\cos(\omega_j t), \quad (7)$$

где $W(\omega_j, t)$ – передаточная функция, зависящая от параметра θ_q (частоты изменения жесткости).

При наличии нескольких локальных дефектов виброперемещение $X(\omega_j, t)$ в j-м направлении определяется по выражению

$$X(\omega_j, t) = BK(\tau) \times \\ \times\sum_{i=1}^{m} W(\omega_j t)\left(\Delta_{\max} - \frac{\Delta_з + \Delta_н}{2}\right)^{3/2} e(\delta_{qi})\cos(\omega_j t). \quad (8)$$

При величине $\Delta > [\Delta]=\Delta_{max}$ нагрузка на тела качения, находящиеся в зоне нагружения, становится максимальной, и они не в состоянии преодолеть эту зону, в результате чего происходит заклинивание, которое приводит к внезапному отказу РАУ. Анализ отказов и работы аэрокосмических изделий в условиях длительной эксплуатации показал, что параметр Δ_{max} соответствует допускаемым значениям деформации шарика: $[\delta]=1\div6$ мк (для внутреннего кольца) и $[\delta]=1{,}7$ мк (для наружного кольца). При превышении δ допускаемых значений на шариках образуются вмятины.

При измерении вибрации рассчитывается малый параметр ζ_q^j

$$\xi_q^j = L_q^j\left\{\left[\Omega_j^2-\left(2\pi f_s\right)^2-\left(\theta_q\right)^2\right]^2-\left(4\pi f_s\theta_q\right)^2\right\}\times$$

$$\times\Omega_j^{-2}\left\{\left[\Omega_j^2-\left(2\pi f_s\right)^2-\left(\theta_q\right)^2\right]^2+\left(4\pi f_s\theta_q\right)^2\right\}^{-\frac{1}{2}}, \quad (9)$$

где $L_q^j(f_s'f_s)=\dfrac{A'(f_s+\theta_q)}{A(f_s)}$ – отношение амплитуд информационных параметров (виброперемещений, виброскоростей или виброускорений), измеряемых на парных информационных частотах f_s', f_s; Ω_j – частота собственных колебаний кольца подшипника, $\Omega_j=\sqrt{\dfrac{C_{j0}}{M}}$; C_{j0} – жесткость подшипника без учета дефектов; M – присоединительная масса вибрирующего кольца.

Линейные колебания k-го зубчатого колеса можно представить следующим дифференциальным уравнением:

$$\ddot{x}_{kj}+\Omega_{kj}^2\left(1+\sum_s\xi_{kjs}\cos\omega_s t\right)X_{kj}=\frac{1}{M_k}F_j, \quad (10)$$

где X_{kj} – виброперемещения k-го зубчатого колеса в j-м направлении; Ω_{kj} – частота собственных колебаний k-го зубчатого колеса, $\Omega_{kj}=\sqrt{\dfrac{C_{kj0}}{M_k}}$, C_{kj0} – жесткость k-го зубчатого колеса без учета дефектов, M_k – присоединительная масса вибрирующего k-го зубчатого колеса; ζ_{kjs} – малый параметр, равный отношению переменной составляющей жесткости C_{kjs} на частоте $\omega_s=2\pi f_s$ к постоянной составляющей жесткости C_{kj0}, $\xi_{kjs}=\dfrac{c_{kjs}}{c_{kj0}}$; F_j – возмущающие силы, обусловленные технологическими погрешностями зацепления, также рассчитываются по формуле (4), вместо параметров подшипника в формулу (4) подставляются параметры k-го зубчатого колеса.

При измерении вибрации зубчатого колеса малый параметр ζ_{kjs} также рассчитывается по формуле (9). В формулу (9) подставляются параметры диагностируемого k-го зубчатого колеса.

Обозначив

$$\Omega_{kj}^2\left(1+\sum_s\xi_{kjs}\cos\omega_s t\right)=A,\ \frac{1}{M_k}=B,$$

уравнение (10) представим в матричной форме [7] $\ddot{\mathbf{X}}+\mathbf{AX}=\mathbf{BF}$.

Технологические погрешности зубчатых колес понижают кинематическую точность и создают условия для формирования локальных дефектов, которые развиваются лавинообразно и могут стать в процессе эксплуатации причиной внезапного функционального отказа РАУ. Локальные дефекты зубчатых колес создают ударные импульсы, которые на начальном этапе развития локальных дефектов могут диагностироваться как шум.

В информационном сигнале локальные дефекты зубчатых колес так же, как и локальные дефекты подшипниковых узлов, проявляются в виде последовательности импульсов малой длительности [3–6]. Параметры ударных импульсов определяются геометрическими погрешностями изготовления зубчатых колес. При ударе энергия относительного движения переходит в энергию совместных колебаний зубьев. Поэтому удар зубьев рассматривается как мгновенный абсолютно неупругий и характеризуется дельта-функцией $\delta(t)$

$$F(t)=\sum_{l=0}^{\infty}F_l\delta\left(t-lT-\upsilon_l\right),$$

где T – период времени поворота шестерни на угловой шаг; l – номер пары зубьев, входящих в зацепление; υ_l – относительная скорость соударяющихся зубьев.

Для идеальной зубчатой пары можно записать

$$L_1=r_1\varphi_1;\ L_2=r_2\varphi_2,$$

где L_1, L_2, φ_1, φ_2 – приращения линий действия и соответствующие им углы поворота ведущего и ведомого колес. Для идеальных колес $L_1=L_2$.

Каждому искажению профиля зуба, вызывающему дополнительное перемещение сопряженного прямолинейного профиля, соответствует вполне определенное изменение мгновен-

ного плеча на величину δ_r. Аналитическая зависимость между функциональной ошибкой по линии действия ΔL и изменением плеча δ_r имеет вид $\Delta L = \int \delta_r d\varphi + C$.

Суммарная ошибка зубчатой пары равна $\Delta L_\Sigma = \Delta L_1 + \Delta L_2$. Вследствие ошибки ΔL_Σ ведомое колесо повернется на дополнительный угол $\Delta\varphi_2$ и полный угол поворота ведомого колеса реальной зубчатой передачи будет равен

$$\varphi_{2p} = \varphi_2 + \Delta\varphi_2 = \varphi_1 U_{12} + \frac{\Delta L_\Sigma}{r_{p2}}.$$

Для реального зубчатого колеса можно записать

$$L_p = L + \Delta L = \int r_p d\varphi + C = \int (r + \delta_r) d\varphi + C = \\ = r\varphi + \int \delta_r d\varphi + C.$$

Аналитическое выражение для функции ошибки зубчатого колеса имеет вид

$$\Delta L = \Delta e + \Delta f = e\sin\varphi + f\sin(z\varphi + \psi),$$

где e и f – амплитуды ошибок; φ – угол поворота колеса; ψ – фазовый сдвиг ошибки; z – число зубьев колеса.

Радиус основной окружности реального колеса будет переменной величиной

$$r_p = \frac{dL_p}{d\varphi}(L + \Delta L) = r + e\cos\varphi + zf\cos(z\varphi + \psi).$$

В качестве контролируемого параметра, характеризующего изменение технического состояния зубчатого колеса, выберем комплексный параметр $\delta_{1,2}$ – приращение линии действия зубчатой пары:

$$\delta_{1,2} = L_1 + L_2 + x_1 - x_2 + [\Delta_1 + \Delta_2], \qquad (11)$$

где x_1, x_2 – линейные перемещения зубчатой пары; Δ_1, Δ_2 – технологические погрешности зубчатой пары.

Для определения виброперемещений зубчатых колес $X(\omega_j, t)$ в j-м направлении при наличии одного или нескольких локальных дефектов также можно использовать формулы (8), (9). Для этого вместо комплексного параметра Δ в данные формулы необходимо подставить рассчитываемый по формуле 11 параметр $\delta_{1,2}$. Таким образом, колебания подшипников и зубчатых колес можно описать выражением $\mathbf{X}(\omega_j, t) = \mathbf{W}(\omega_j, t)\,\mathbf{F}(\omega_j, t)$.

Дифференциальные уравнения, описывающие колебания колец подшипника и зубчатых колес, используются при составлении динамической модели, характеризующей техническое состояние редуктора. Расчетная динамическая

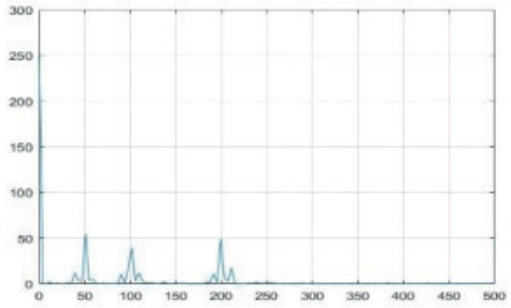


Рис. 4. Спектральное представление выделенного цифровым фильтром информационного сигнала

модель редуктора представляет собой связанные через зубья колебательные цепи, совершающие вращательные и поступательные движения.

Источниками механических колебаний (вибраций) являются высокочастотные и низкочастотные возмущения. К высокочастотным возмущениям можно отнести технологические погрешности зацепления, переменную жесткость зацепления, удары при входе зубьев в зацепление и зарождающиеся локальные дефекты. Низкочастотные вибрации могут проявляться на частоте сепаратора подшипника (35 Гц, 50 Гц), на частоте вращения вала (100 Гц и кратной ей частоте 200 Гц) (рис. 4).

Вибрация на частоте вращения вала может быть вызвана дисбалансом вращающихся масс, прогибом вала, его температурным изгибом. Низкочастотная вибрация на частоте, равной половине частоты вращения вала (50 Гц), возникает из-за потери устойчивости вращения вала на масляном слое [1, 2].

Редукторную систему РАУ можно рассматривать как линейную систему с дискретными массами и упругими связями, находящимися под действием детерминированного возбуждения. Поэтому динамическое состояние редуктора в установившемся режиме работы можно описать дифференциальными уравнениями второго порядка. Таким образом, математическая модель технического состояния механической системы РАУ (рис. 1) записывается в виде

$$J_{\text{дв}}\ddot{\tilde{\varphi}}_{\text{дв}} + c_{\text{дв1}}(t)(\tilde{\varphi}_{\text{дв}} - \tilde{\varphi}_1) = M_{\text{дв}}(t),$$
$$J_1\ddot{\tilde{\varphi}}_1 + c_{\text{дв1}}(t)(\tilde{\varphi}_1 - \tilde{\varphi}_{\text{дв}}) = r_1 F_{12},$$
$$J_2\ddot{\tilde{\varphi}}_2 + c_{23}(t)(\tilde{\varphi}_2 - \tilde{\varphi}_3) = r_2 F_{12},$$
$$J_3\ddot{\tilde{\varphi}}_3 + c_{23}(t)(\tilde{\varphi}_3 - \tilde{\varphi}_2) = r_3 F_{34},$$
$$J_4\ddot{\tilde{\varphi}}_4 + c_{4\text{н}}(t)(\tilde{\varphi}_4 - \tilde{\varphi}_{\text{н}}) = r_4 F_{34},$$
$$J_{\text{н}}\ddot{\tilde{\varphi}}_{\text{н}} + c_{4\text{н}}(t)(\tilde{\varphi}_{\text{н}} - \tilde{\varphi}_4) = M_{\text{н}}(t),$$

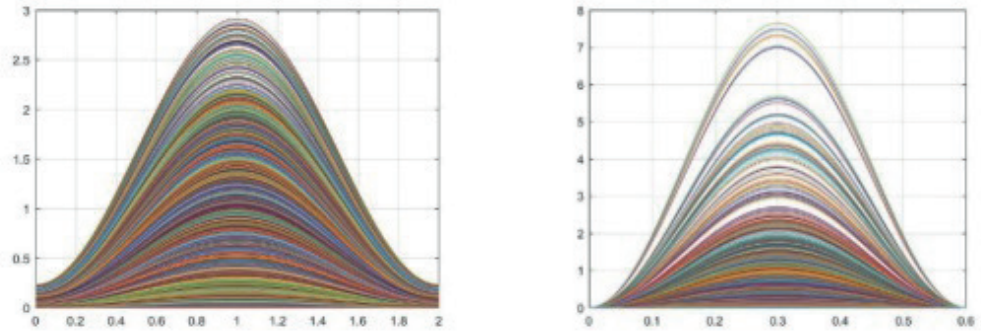


Рис. 5. Выделение из модулированного сигнала информационных составляющих

$$m_1\ddot{x}_1 + c_{x1}(t)x_1 = F_{12},$$
$$m_2\ddot{x}_2 + c_{x2}(t)x_2 = F_{12},$$
$$m_3\ddot{x}_3 + c_{x3}(t)x_3 = F_{34},$$
$$m_4\ddot{x}_4 + c_{x4}(t)x_4 = F_{34},$$

где $M_{дв}$ – момент на валу двигателя РАУ; $M_н$ – момент на нагрузке (винтовой паре); F_{12}, F_{34} – динамические нагрузки в зацеплении соответствующей пары зубчатых колес; $\tilde{\varphi}_{дв}$, $\tilde{\varphi}_1$, $\tilde{\varphi}_2$, $\tilde{\varphi}_3$, $\tilde{\varphi}_4$ – угловые колебания двигателя, зубчатых колес и нагрузки; x_1, x_2, x_3, x_4 – линейные колебания зубчатых колес; $J_{дв}$, J_1, J_2, J_3, J_4, $J_н$ – моменты инерции двигателя, зубчатых колес и нагрузки; m_1, m_2, m_3, m_4 – массы зубчатых колес; $c_{дв1}(t)$, $c_{23}(t)$, $c_{4н}(t)$, $c_{x1}(t)$, $c_{x2}(t)$, $c_{x3}(t)$, $c_{x4}(t)$ – переменные жесткости зацепления и опор.

При отсутствии изменения технического состояния с датчика вибрации снимается квазигармонический сигнал

$$A(t) = X(t) + \varepsilon(t),$$

где $X(t)$ – составляющая сигнала, определяемая гармоническими составляющими (технологическими погрешностями); $\varepsilon(t)$ – шум (собственный шум канала измерения и внешний шум). В качестве модели шума используется равномерное распределение, поскольку белый шум физически нереализуем, так как имеет бесконечную дисперсию. При наличии концентраторов напряжений, формирующих локальные дефекты, с датчика вибрации снимается сигнал [3, 4, 5]

$$S(t) = (1 + mB(t))A(t) + \varepsilon(t),$$

где m – глубина модуляции; $B(t)$ – сигнал от локального дефекта.

Для диагностирования технического состояния РАУ применяется нелинейный метод демодуляции информационного вибросигнала. Нелинейное преобразование информационного сигнала соответствует математической операции $y_n = \sqrt{x_n^2} = abs(x_n)$. Такой вид нелинейного преобразования подобен цифровому квадратичному детектору [3, 5, 6]. Возведение сигнала в большую чем второго порядка степень приводит к увеличению количества паразитных частот и амплитудным ошибкам.

Моделирование показало, что мультипликативный сигнал можно расшифровать только после нелинейного преобразования. Без его применения происходит умножение слагаемых, после которого изменяются исходные информационные частоты и амплитуды сигнала. Результаты диагностирования становятся недостоверны.

После применения нелинейного преобразования мультипликативный сигнал разделяется на составляющие огибающей и накопителя. Для выделения информационных составляющих производится узкополосная фильтрация, весовые коэффициенты фильтра b_k умножаются на сглаживающие временные окна Хэннинга, или Хэмминга, W_n: $b_k' = b_k \cdot W_n$. В цифровом плане нерекурсивный фильтр реализуется при помощи задержки исходного сигнала на $n/2$ [3, 6].

На этапе моделирования функцию узкополосного фильтра может выполнять быстрое преобразование Фурье *fft*. Сглаживающие временные окна реализуются командами W_n=*hanning(length(s)); s2=s1'.*W*$_n$; либо W_n=*hamming(length(s1))*. Выделить зарождающиеся локальные дефекты на фоне гармонических вибраций механической системы затруднительно. Поэтому для их обнаружения применяется фоновый метод [3, 4, 6]. При моделировании в пакетах Matlab и *Wolfram Mathematica* из модулированных сигналов были выделены информационные составляющие (рис. 5).

Результаты измерений виброперемещений x (мк) на информационных частотах f_s и математического моделирования РАУ приведены в таблице. В выделенном на РАУ спектре виброперемещения присутствуют периодически повторяющиеся всплески на информационной частоте $f_н$=240 Гц. Это частота локального дефекта на-

ружного кольца подшипника. Также наблюдаются вибрации на частоте сепаратора $f_с = 35$ Гц, частоте вращения вала $f_в = 100$ Гц и кратной ей частоте 200 Гц. В отличие от колебаний на частоте 240 Гц они носят гармонический характер. Уровень вибрации на частоте $f_н = 240$ Гц равен 41,12 ДБ и не превышает допустимый порог измеряемой величины, равный 50 ДБ. То есть данное изделие РАУ при наличии локального дефекта пока еще находится в рабочем состоянии.

Таблица

f_s, Гц	35	100	200	240
x, мк моделирование	2,76	4,6	1,38	1,84
x, мк эксперимент	3	5	1,5	2

Результаты математического моделирования в пакетах Matlab и *Wolfram Mathematica* показали, что при наличии локальных дефектов и технологических погрешностей наиболее ответственных элементов механической системы РАУ может увеличиться время переходного процесса управления, которое зависит от скорости движения штока. Средняя скорость перемещения штока $V_{ср}$ будет равна

$$V_{ср} = \frac{L_с}{(t + \Delta t)},$$

где Δt – время, затрачиваемое элементом механической системы на преодоление зоны локального дефекта.

При изменении времени переходного процесса управления в пределах $\Delta t = 0{,}1 \div 2$ с средняя скорость перемещения штока $V_{ср}$ по механическим упорам в этом случае уменьшается с 70 до 8 мм/с, что не соответствует заданным в технической документации параметрам (рис. 6).

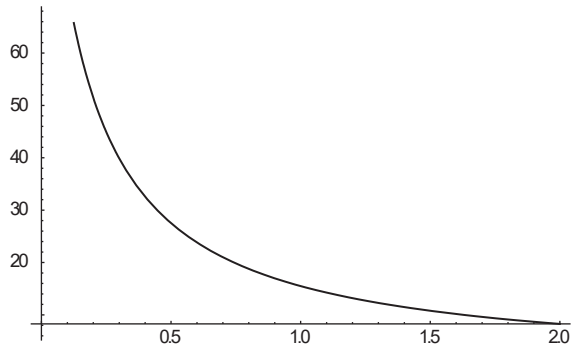


Рис. 6. Изменение скорости перемещения штока $V_{ср}$ по механическим упорам

Таким образом, результаты испытаний и математического моделирования подтвердили, что создание условий формирования локальных дефектов, их зарождение и дальнейшее развитие связаны с изменением амплитуды переменной составляющей жесткости механической системы.

Локальные дефекты и технологические погрешности наиболее ответственных элементов механической системы РАУ увеличивают время переходного процесса управления, что может послужить причиной внезапного отказа аэрокосмического изделия. По результатам моделирования также можно сделать вывод, что полученная математическая модель технического состояния механической системы адаптирована к кинематике и динамике РАУ.

Предлагаемая методика оценки уровня вибрации, основанная на нелинейной обработке информационных параметров, позволяет оценивать техническое состояние наиболее ответственных элементов РАУ.

Библиографический список

1. Колебания машин, конструкций и их элементов // Вибрации в технике / Под ред. Ф. М. Диментберга и К. С. Колесникова. М.: Машиностроение, 1980. 544 с.
2. *Явленский, К. Н.* Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем / К. Н. Явленский, А. К. Явленский. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1983. 239 с.
3. *Опалихина, О. В.* Применение цифровых фильтров для оценки механических колебаний. СПб.: ГУАП, 2015. С. 212–219.
4. *Опалихина, О. В.* Цифровая обработка информационного сигнала. СПб.: ГУАП, 2016. С. 263–270.
5. *Опалихина, О. В.* Нелинейный метод исследования технического состояния роторной системы. СПб.: ГУАП, 2017. С. 39–50.
6. *Опалихина, О. В.* Нелинейный метод исследования вибрации роторной системы // Topical areas of fundamental and applied research XI: Proceedings of the Conference. North Charleston, 27–28.02.2017. Vol. 1. North Charleston, SC, USA: CreateSpace, 2017. P. 138–141.
7. Компьютерные технологии в механике приборных систем / Под общ. ред. В. Г. Мельникова. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. 118 с.

УДК 544.33

А. Б. Плаченов
кандидат физико-математических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Б. Т. Плаченов
доктор химических наук, профессор

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭФФЕКТА ОКАНТОВКИ В НЕСЕРЕБРЯНЫХ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

В статье описывается математическая модель эффекта окантовки в системах на основе твердых растворов комплексных ионов тяжелых металлов в поливиниловом спирте.
***Ключевые слова**: цепной процесс, несеребряная фотография, эффект окантовки.*

A. B. Plachenov
PhD. Phys.-Math., Associate Professor
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
B. T. Plachenov
PhD. Chem., Professor

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE BORDER EFFECT IN NON-SILVER PHOTOGRAPHIC MATERIALS

The article presents the mathematical model of the border effect in systems containing solid solvents of complex ions of heavy metals in polyvinyl alcohol.
***Keywords:** chain process, non-silver photography, border effect.*

В 80-х – начале 90-х годов XX века на базе главным образом Ленинградского механического и Хабаровского педагогического институтов был выполнен цикл работ, посвященных исследованию фото- и радиационно-инициированных процессов в тонких пленках поливинилового спирта (ПВС), содержащих в составе полимерных цепочек комплексные ионы золота, меди, платины, висмута и других металлов. Эти исследования были связаны с необходимостью поиска новых фотоматериалов в связи с перспективой быстрого исчерпания запасов серебра.

В настоящее время развитие цифровой фотографии радикально снизило остроту проблемы. Тем не менее в некоторых областях традиционные методы записи фотографической информации все еще остаются предпочтительными, и новые материалы, основанные на проведенных исследованиях, могут оказаться полезными. В то же время мы хотим подчеркнуть, что физические процессы, обнаруженные в рассматриваемых материалах, сами по себе представляют интерес и некоторые из них так и не имеют до сих пор удовлетворительного объяснения.

Как было установлено в работах [1–6], процесс фото- и радиационно-инициированного разложения галогенсодержащих соединений некоторых металлов в пленках ПВС, таких как твердые растворы $H[AuCl_4]$-ПВС, имеет цепной характер. Начало процесса инициируется возбуждением галогена в комплексном ионе золота:

$$[AuCl_4]^- + h\nu \rightarrow \left\{[AuCl_4]^-\right\}^* \rightarrow \rightarrow AuCl + 2Cl^\bullet + Cl^- . \quad (1)$$

В результате первичной реакции (1) образуются хлор-радикалы $Cl^\bullet$, которые перемещаются вдоль полимерной цепи и вызывают разложение ионов:

$$[AuCl_4]^- + Cl^\bullet \rightarrow \left\{[AuCl_4]^-\right\}^* \rightarrow \rightarrow AuCl + 2Cl^\bullet + Cl_2 + Cl^- . \quad (2)$$

Реакция продолжения цепи (2) многократно повторяется, длина цепи оказывается не меньше 10^3. Этой реакции способствуют одновремен-

но идущие реакции между $Cl^{\bullet}$-радикалами и ПВС, также имеющие цепной характер. В процессе распространения радикалы могут захватываться ловушками или взаимодействовать между собой, образуя молекулы хлора, что ведет к обрыву цепи. Аналогичные процессы происходят в пленках ПВС, содержащих комплексные ионы других металлов.

После разложения комплексных ионов металлов могут происходить некоторые дополнительные реакции, продукты которых – атомы металла или молекулы соли – диффундируют и агрегируют.

Если пленка засвечивается равномерно, продукты распада агрегируют в точечные центры, которые также равномерно распределены, причем с возрастанием концентрации металла (соли) возрастает и концентрация центров агрегации, в то время как их размеры уменьшаются, поскольку вероятность образования центра растет нелинейно с увеличением концентрации металла.

Если же пленка засвечивается неравномерно, то, как правило, концентрация агрегированного металла (соли) растет с ростом плотности поглощенного излучения. Тем не менее если такая плотность имеет скачок, причем в освещенной области она очень высока, а в неосвещенной пренебрежимо мала, то наблюдается дополнительный рост точечных центров вблизи границы этих областей (эффект окантовки [4]). При этом концентрация точечных центров в окрестности границы остается приблизительно такой же, как и в глубине освещенной области, а в зоне тени вблизи границы наблюдаются редкие центры большого размера.

Для объяснения этого эффекта была предложена следующая модель. После интенсивной засветки почти все комплексные ионы в освещенной зоне разлагаются, и атомы металла (молекулы соли) агрегируют в точечные центры приблизительно одинакового размера и концентрации. При этом возникающие в первичной реакции (1) $Cl^{\bullet}$-радикалы перемещаются в зону тени и вызывают там вторичную реакцию (2). Возникающие при этом атомы металлов (молекулы соли) также диффундируют. Поскольку скорость реакции (2) невелика, концентрация металла (соли) также мала. В этих условиях основная часть металла не образует центров в зоне тени, а оседает на приграничных центрах засвеченной области, вызывая их рост.

Для описания этих процессов была предложена упрощенная математическая модель, к описанию которой мы переходим. В дальнейших построениях t – время, x – координата (отрицательная в засвеченной области и положительная в зоне тени). Под $N_*(t, x)$ будут пониматься концентрации участвующих в реакции частиц, при этом вместо звездочки будут использованы индексы i (для комплексных ионов $[AuCl_4]^-$), Cl (для $Cl^{\bullet}$-радикалов), T (для ловушек), m (для молекул AuCl), p (для точечных центров агрегации фазы). Для числа молекул в таких центрах используется обозначение $n(t, x)$. Верхние индексы 0 и ∞ соответствуют начальному ($t=0$) и конечному ($t\to\infty$) значению соответствующей функции. Константы, отвечающие начальным концентрациям частиц, вероятностные коэффициенты и коэффициенты диффузии будут обозначаться буквами c, α и D с соответствующими индексами. Кроме того, будут полезны обозначения вида

$$W_*(x)=\int_0^\infty N_*(t,x)\,dt. \tag{3}$$

Начать рассмотрение оказывается удобно с уравнения, описывающего концентрацию ловушек. Их число постоянно в начальный момент времени и убывает при поглощении ловушками $Cl^{\bullet}$-радикалов:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial N_T}{\partial t}=-\alpha_T N_T N_{Cl}, \\ N_T^0=c_T. \end{cases} \tag{4}$$

Из решения задачи (4) следует, что

$$N_T^\infty = c_T e^{-\alpha_T W_{Cl}}, \tag{5}$$

откуда

$$c_T\left(e^{-\alpha_T W_{Cl}}-1\right)=-\int_0^\infty \alpha_T N_T N_{Cl}\,dt. \tag{6}$$

Далее, рассмотрим уравнение, описывающее концентрацию $Cl^{\bullet}$-радикалов:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial N_{Cl}}{\partial t}=D_{Cl}\dfrac{\partial^2 N_{Cl}}{\partial x^2}-\alpha_T N_T N_{Cl}, \\ N_{Cl}^0=c_{Cl}\theta(-x). \end{cases} \tag{7}$$

Начальная концентрация постоянна и равна c_{Cl} в засвеченной области, а в зоне тени равна нулю (θ – функция Хевисайда). В дальнейшем радикалы диффундируют и поглощаются ловушками. В предположении, что $c_{Cl} < c_T$, в конце процесса все радикалы будут поглощены, и

$$N_{Cl}^\infty = 0. \tag{8}$$

Решая задачу (7) с учетом (6) и (8), получаем краевую задачу для обыкновенного дифферен-

циального уравнения относительно функции $W_{Cl}(x)$:

$$\begin{cases} D_{Cl}W_{Cl}^{\cdot\cdot} - c_T\left(e^{-\alpha_T W_{Cl}} - 1\right) + c_{Cl}\theta(-x) = 0, \\ W_{Cl} \underset{x\to-\infty}{\to} \dfrac{1}{\alpha_T}\ln\left[\dfrac{c_T}{c_T - c_{Cl}}\right], \\ W_{Cl} \underset{x\to+\infty}{\to} 0. \end{cases} \quad (9)$$

Ее решение может быть записано в виде

$$\begin{cases} x = -\sqrt{\dfrac{D_{Cl}\alpha_T}{2c_T}} \times \\ \times \displaystyle\int_{W_{Cl}(0)}^{W_{Cl}(x)} \frac{dW}{\sqrt{e^{-\alpha_T W} - \dfrac{c_T - c_{Cl}}{c_T}\left(1 + \ln\left(\dfrac{c_T - c_{Cl}}{c_T}\right)\right) - \alpha_T W}}, \\ \qquad x < 0, \\ x = \sqrt{\dfrac{D_{Cl}\alpha_T}{2c_T}} \displaystyle\int_{W_{Cl}(x)}^{W_{Cl}(0)} \frac{dW}{\sqrt{e^{-\alpha_T W} - 1 + \alpha_T W}}, \quad x > 0, \\ W_{Cl}(0) = \dfrac{1}{\alpha_T}\left(1 - \dfrac{c_T - c_{Cl}}{c_{Cl}}\ln\left(\dfrac{c_T}{c_T - c_{Cl}}\right)\right). \end{cases} \quad (10)$$

Концентрация комплексных ионов $[AuCl_4]^-$ описывается следующим уравнением:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial N_i}{\partial t} = -\alpha_m N_i N_{Cl}, \\ N_i^0 = c_i\theta(x). \end{cases} \quad (11)$$

Начальная концентрация ионов постоянна в области тени (считаем, что в экспонированной области все ионы уже разложились под действием пучка света), далее она убывает в результате реакции (2). При этом $c_{Cl}=2c_i$, поскольку в первичной реакции (1) при разложении одного иона $[AuCl_4]^-$ возникают два хлор-радикала. В результате решения задачи (11) получаем, что

$$N_i^\infty = c_i\theta(x)e^{-\alpha_T W_{Cl}}, \quad (12)$$

откуда

$$c_i\theta(x)\left(e^{-\alpha_T W_{Cl}} - 1\right) = -\int_0^\infty \alpha_m N_i N_{Cl}\, dt. \quad (13)$$

Далее, рассмотрим уравнение, описывающее концентрацию молекул AuCl:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial N_m}{\partial t} = \alpha_m N_i N_{Cl} + D_m\dfrac{\partial^2 N_m}{\partial t^2} - \alpha_p(n)N_p N_m, \\ N_m^0 = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Эти молекулы возникают в зоне тени в результате реакции (2), диффундируют и осаждаются на фазовых центрах, образовавшихся в засвеченной области сразу после первичной реакции (1). При этом вероятность последней реакции зависит от размера этих центров. Согласно нашей упрощенной модели, агрегации молекул AuCl в неэкспонированной области не происходит, и поэтому

$$N_p = 0, \quad x > 0. \quad (15)$$

В результате реакции свободных молекул AuCl не остается, т. е.

$$N_m^\infty = 0. \quad (16)$$

Интегрируя (14) с учетом (13), (15) и (16), получаем для зоны тени

$$\begin{cases} D_m W_m^{\cdot\cdot} + c_i\left(1 - e^{-\alpha_m W_{Cl}}\right) = 0, \quad x > 0, \\ W_m \underset{x\to+\infty}{\to} 0, \\ W_m^{\cdot} \underset{x\to+\infty}{\to} 0, \end{cases} \quad (17)$$

откуда

$$W_m^{\cdot}(0) = \frac{c_i}{D_m}\sqrt{\frac{D_{Cl}\alpha_T}{2c_T}} \int_0^{W_{Cl}(0)} \frac{\left(1 - e^{-\alpha_M W}\right)dW}{\sqrt{e^{-\alpha_T W} - 1 + \alpha_T W}}. \quad (18)$$

Отметим, что величина $D_m W'_m(0)$ описывает общее количество соли AuCl, образовавшейся в результате реакции (2) в зоне тени, в расчете на единицу длины границы засвеченной и незасвеченной областей.

Переходим к рассмотрению точечных фазовых центров. Как сказано ранее, их концентрацию в зоне тени мы считаем равной нулю, а в засвеченной области – постоянной:

$$N_p = c_p\theta(-x). \quad (19)$$

Число молекул n^0 в центрах, возникших в результате первичной реакции (1), мы также считаем постоянным, и поскольку все образованные молекулы соли агрегировали в эти центры, то

$$N_p n^0 = c_i. \quad (20)$$

Процесс роста центров в засвеченной области вследствие поглощения молекул соли, образовавшихся в результате цепного процесса (2), описывается уравнением

$$\begin{cases} \dfrac{\partial n}{\partial t} = \alpha_p(n) N_m, \\ n^0 = \dfrac{c_i}{c_p}\theta(-x). \end{cases} \tag{21}$$

Из (3) и (21) следует, что

$$\int\limits_{n^0}^{n^\infty} \frac{dn}{\alpha_p(n)} = W_m, \tag{22}$$

откуда

$$W_m^{\cdot} = \frac{n^{\infty\,\cdot}}{\alpha_p(n^\infty)}. \tag{23}$$

Кроме того, из (21) следует, что

$$\int\limits_0^\infty \alpha_p(n) N_m \, dt = n^\infty - n^0. \tag{24}$$

Снова обратимся к уравнению (14), но теперь рассмотрим его в экспонированной области. Поскольку $N_i = 0$ при $x < 0$, после интегрирования получаем с учетом (24):

$$D_m W_m^{\cdot\cdot} + c_p\left(n^\infty - n^0\right) = 0, \quad x < 0. \tag{25}$$

Это уравнение с учетом (23) позволяет получить краевую задачу для функции n^∞:

$$\begin{cases} D_m\left(\dfrac{n^{\infty\,\cdot}}{\alpha_p(n^\infty)}\right)^{\cdot} + c_p\left(n^\infty - n^0\right) = 0, \quad x < 0, \\ n^\infty \underset{x\to-\infty}{\to} n^0, \\ \dfrac{n^{\infty\,\cdot}(0)}{\alpha_p(n^\infty(0))} = W_m^{\cdot}(0), \end{cases} \tag{26}$$

Из (26) вытекает, что

$$\begin{cases} x = -\sqrt{\dfrac{D_m}{2c_p}} \displaystyle\int\limits_{n^\infty(x)}^{n^\infty(0)} \left[\alpha_p(n) \Big/ \int\limits_{n^0}^{n} \frac{\nu - n^0}{\alpha_p(\nu)} d\nu \right] dn, \\ \displaystyle\int\limits_{n^0}^{n^\infty(0)} \frac{n - n^0}{\alpha_p(n)} dn = \frac{D_m W_m^{\cdot}(0)}{2c_p}, \end{cases} \tag{27}$$

первое уравнение системы (27) задает связь n^∞ и координаты x, а второе определяет константу $n^\infty(0)$, входящую в первое. Кроме того, из (26) мы получаем полезное равенство

$$\alpha_p(n^\infty) = \frac{D_m}{c_p} \frac{n^{\infty\,\cdot}(x)}{\displaystyle\int\limits_{-\infty}^{x} (n^\infty(x') - n^0) dx'}. \tag{28}$$

Вид решения (27) довольно громоздок и не слишком нагляден. Тем не менее для важного частного случая, когда вероятностная функция $\alpha_p(n)$ пропорциональна площади сечения фазового центра, т. е.

$$\alpha_p(n) = A n^{2/3}, \tag{29}$$

где A – некоторая константа, эта формула допускает обращение:

$$n^\infty(x) = n^0 \left\{ 1 + \frac{3}{\dfrac{\operatorname{sh}\left(B - \sqrt{\dfrac{c_p A}{D_m}} \sqrt[3]{n^0}\, x \right)}{\sqrt{2}} - 1} \right\}^3, \tag{30}$$

где

$$B = \operatorname{Arsh}\left(\sqrt{2}\left(1 + \frac{3}{\mu - 1} \right) \right), \tag{31}$$

а μ, в свою очередь, связывает наименьшее n^0 и наибольшее $n^\infty(0)$ число частиц в фазовом центре

$$n^\infty(0) = \mu^3 n^0 \tag{32}$$

и удовлетворяет уравнению

$$(\mu - 1)^2(\mu^2 + 2\mu + 3) = \frac{A c_i D_{Cl}}{3\sqrt[3]{n^0} D_m \alpha_T c_T} \left[\int\limits_0^Z \frac{1 - e^{-\frac{\alpha_m}{\alpha_T} u}}{\sqrt{e^{-u} - 1 + u}} du \right]^2, \tag{33}$$

где

$$Z = 1 - \frac{c_T - c_{Cl}}{c_{Cl}} \ln\left(\frac{c_T - c_{Cl}}{c_{Cl}} \right). \tag{34}$$

Несмотря на то, что в работе использовалась довольно грубая модель процесса, результаты вычислений находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными.

Библиографический список

1. A chain mechanism of radiolysis and photolysis in H[$AuCl_4$]-polyvinyl alcohol system / A. P. Fedorova, A. L. Kartuzhanski, B. J. Peshchevitski, B. T. Plachenov // Radiat. Phys. Chem. 1985. Vol. 26. N 3. P. 273–276.
2. *Плаченов, А. Б.* Цепной процесс разложения галогенидных комплексных ионов и запись информации / А. Б. Плаченов, Б. Т. Плаченов, А. П. Фёдорова, С. И. Церковный // Изв. АН Латв. ССР. Сер. Физ. техн. 1987. № 5. С. 52–61.
3. *Захаров, Ю. А.* Фотолиз систем поливиниловый спирт — галогенсодержащее соединение висмута / Ю. А. Захаров, А. Л. Картужанский, Б. Т. Плаченов и др. // ЖНиПФиК, 1987. Т. 32, № 3. С. 161–167.
4. Особенности фотостимулированного разложения плёнки ПВС-H[$AuCl_4$] на границе зоны экспонирования (эффект окантовки) / А. Б. Плаченов, Б. Т. Плаченов, И. И. Смирнова, Г. В. Котов // ЖФХ А, 1991. Т. 65, № 6. С. 1447–1453.
5. Радиационно-стимулированное образование фрактальных кластеров AuCl и Cu^0 / А. Б. Плаченов, Б. Т. Плаченов, И. И. Смирнова, И. В. Соколова // Тезисы докладов 8-й конференции по физике и химии неорганических материалов. Т. II. Томск: ТПУ, 1993. С. 75.
6. *Plachenov, A. B.* Border effect, fractal structures and brightness oscillations in non-silver photographic materials / A. B. Plachenov, B. T. Plachenov // Nanosystems: Phys., Chem., Math. 2015. Vol. 6. N 1. P. 133–139.

УДК 539.3:539.5

Т. А. Забавникова
преподаватель
Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого
С. П. Помыткин
доктор физико-математических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ОПИСАНИЕ НЕКОТОРЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ В НЕЛИНЕЙНЫХ ЭНДОХРОННЫХ МОДЕЛЯХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

В рамках эндохронного подхода предлагаются варианты нелинейных определяющих соотношений теории ползучести тензорно-параметрического типа, учитывающие зависимость поведения материалов от вида напряженного состояния, а также большие деформации и повороты. Приведен пример, демонстрирующий возможности подхода.

***Ключевые слова**: ползучесть, нелинейная модель, определяющие соотношения, эндохронный подход.*

T. A. Zabavnikova
Lecturer
Military Telecommunication Academy
S. P. Pomytkin
PhD. Phys.-Math., Associate Professor
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DESCRIPTION OF SOME CREEP EFFECTS BY NONLINEAR ENDOCHRONIC MODELS OF DEFORMATION

In the framework of the endochronic approach, two variants of the tensor-parametric non-linear constitutive relations of the creep theory are proposed. These equations take into account the dependence of the material behavior on the stress state view, as well as large deformations and rotations. Some possibilities of the approach are demonstrated by presented example.

***Keywords:** creep, nonlinear model, constitutive equations, endochronic approach.*

Введение

Имеющиеся для ряда материалов экспериментальные данные [1–3] указывают на то, что их неупругое поведение в процессе ползучести может зависеть от вида напряженного состояния. Обычными проявлениями такой зависимости в изотермических условиях являются: отсутствие «единой» кривой «интенсивность деформации ползучести ~ время» при одинаковой интенсивности действующих напряжений на различных пропорциональных путях нагружения; изменение скорости накопления деформаций ползучести при изменении коэффициента пропорциональности действующих напряжений.

Для описания зависимости поведения материалов от вида напряженного состояния в процессе ползучести были предложены некоторые варианты определяющих соотношений теории неупругости [4, 5], учитывающие третий инвариант тензора напряжений, и приведены примеры, демонстрирующие возможности уравнений теории.

Применение других нечетных инвариантов тензора напряжений, также позволяющих описывать физически нелинейное поведение материалов в условиях упругости и пластичности, можно найти, например, в [6] и [7].

В рамках эндохронного подхода уравнения теории пластичности, учитывающие угол вида напряженного состояния, были сформулированы в работе [8]. Примеров, демонстрирующих достоинства такой теории, приведено не было.

В данной работе предлагается подход, позволяющий с помощью нелинейных эндохронных

соотношений тензорно-параметрического типа [9] учитывать и описывать эффекты, возникающие в процессе ползучести и связанные с влиянием вида напряженного состояния на деформируемость материалов.

За основу был принят вариант теории пластического течения, сформулированный в [5] с применением модифицированных соотношений Новожилова для связи двух произвольных девиаторов [10]. Если σ_{ij} – тензор действующих напряжений, а $\dot{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij} - (\sigma_{ii}\delta_{ij})/3$ – его девиатор, то σ_2, σ_3 и ξ – второй, третий инвариант и угол вида напряженного состояния соответственно определяются по формулам

$$\sigma_2 = \dot{\sigma}_{ij}\dot{\sigma}_{ij},\ \sigma_3 = \dot{\sigma}_{ij}\dot{\sigma}_{jk}\dot{\sigma}_{ki},\ \sin 3\xi = -\frac{\sqrt{6}\,\sigma_3}{\sigma_2^{3/2}},$$

$$-\frac{\pi}{6} \le \xi \le \frac{\pi}{6}.$$

Если обозначить через ε_{ij}^c девиатор тензора деформаций ползучести, а через t – физическое время, то из подобия экспериментальных кривых $\varepsilon_{ij}^c \sim t$ при пропорциональных нагружениях в работах [4, 5] можно предположить, что деформации ползучести изменятся по закону

$$(\varepsilon_{ij}^c)^{\bullet} = \Phi(\sqrt{\sigma_2}\cdot\varphi(\xi),\ \lambda).$$

Здесь Φ – функция, выбираемая на основе экспериментальных данных, $\varphi(\xi)$ – материальная функция, учитывающая зависимость деформаций ползучести от вида напряженного состояния, λ – длина дуги неупругого деформирования (параметр Одквиста)

$$d\lambda = \sqrt{d\varepsilon_{ij}^c : d\varepsilon_{ij}^c}\ .$$

В частности, в [5] предлагалось считать, что

$$(\varepsilon_{ij}^c)^{\bullet} = B\left(\sqrt{\sigma_2}\cdot\varphi(\xi)\right)^n \lambda^m \qquad (1)$$

и

$$\varphi(\xi) = \begin{cases} \exp[k_1(\cos 6\xi - 1)], & -\pi/6 \le \xi \le 0 \\ \exp[k_2(\cos 6\xi - 1)], & 0 \le \xi \le \pi/6 \end{cases}. \qquad (2)$$

Очевидно, что в одноосном случае и при $\varphi(\xi) = 1$ соотношения (1) принимают классический вид теории упрочнения [11]:

$$\varepsilon^{\bullet} = B\sigma^n \varepsilon^m.$$

Для идентификации параметров модели (1) были нужны кривые «деформация ~ время» в процессе ползучести изучаемого материала при растяжении, сжатии и кручении с равными интенсивностями действующих напряжений и опыты на ползучесть при растяжении (или кручении) с тремя различными значениями действующих напряжений [5].

Эндохронная теория ползучести, учитывающая вид напряженного состояния

Рассматриваются тензорно-параметрические определяющие соотношения эндохронного типа для описания неупругого поведения материалов, включая различные проявления ползучести [9]. По аналогии с теорией течения [4, 5] для учета влияния вида напряженного состояния вводится девиатор тензора приведенных напряжений

$$\sigma_{ij}^* = \dot{\sigma}_{ij}\cdot\varphi(\xi),$$

где функция $\varphi(\xi)$ показывает отклонение действующих напряжений от напряжений при кручении, при которых считается, что $\varphi(\xi)=1$. Модифицированные таким образом физически нелинейные уравнения теории [9] имеют вид

$$\frac{\sigma_{ij}^*}{2G} + \frac{\alpha\tau}{2G}\frac{d\sigma_{ij}^*}{dr} = \tau\frac{dr_{ij}}{dr} + \frac{r_{ij}}{g+\alpha},\ K\varepsilon_{ii} = \sigma_{ii}, \qquad (3)$$

$$r_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij} - (1-\alpha)\frac{\dot{\sigma}_{ij}}{2G},\ dr = \sqrt{dr_{ij} : dr_{ij}},$$

$$r^{\bullet} = \sqrt{\frac{dr_{ij}}{dt} : \frac{dr_{ij}}{dt}},$$

$$\tau = \tau(r, r^{\bullet}),\ g = g(r, r^{\bullet}),\ r = \int dr.$$

Здесь $\dot{\varepsilon}_{ij}$ и ε_{ii} – девиатор и шаровая часть тензора деформаций, $\dot{\sigma}_{ij}$ и σ_{ii} – девиатор и объемная составляющая тензора напряжений, r_{ij} – девиатор параметрического тензора, τ – аналог деформационного предела текучести материала, g – аналог коэффициента упрочнения (разупрочнения) материала, α – параметр эндохронности ($0 \le \alpha \le 1$), G – модуль сдвига, K – модуль объемного сжатия. В модели (3) предполагается, что параметр, характеризующий деформационный предел текучести τ, и параметр упрочнения материала g могут зависеть не только от инварианта r, но через $r^{\bullet}$ и от физического времени t.

При $\alpha = 1$ параметрический тензор r_{ij} и его инварианты r и $r^{\bullet}$ вырождаются в тензор деформаций ε_{ij} с инвариантами ε и $\varepsilon^{\bullet}$, и опре-

деляющие соотношения (3), сохраняя свойства эндохронности, принимают более удобную для анализа форму:

$$\frac{\sigma^*_{ij}}{2G}+\frac{\tau}{2G}\frac{d\sigma^*_{ij}}{d\varepsilon}=\tau\frac{d\varepsilon_{ij}}{d\varepsilon}+\frac{\dot{\varepsilon}_{ij}}{g+1}, \qquad (4)$$

$$d\varepsilon=\sqrt{d\varepsilon_{ij}:d\varepsilon_{ij}},\ \varepsilon^{\bullet}=\sqrt{\frac{d\varepsilon_{ij}}{dt}:\frac{d\varepsilon_{ij}}{dt}},$$

$$\tau=\tau(\varepsilon,\varepsilon^{\bullet}),\ g=g(\varepsilon,\varepsilon^{\bullet}),\ K\varepsilon_{ii}=\sigma_{ii}.$$

Умножив и разделив уравнения (4) на dt и обозначив $k=1/(g+1)$, получим, что

$$\frac{\sigma^*_{ij}}{2G}+\frac{1}{2G}\frac{d\sigma^*_{ij}}{dt}\frac{\tau}{\varepsilon^{\bullet}}=\frac{d\varepsilon_{ij}}{dt}\frac{\tau}{\varepsilon^{\bullet}}+k\cdot\dot{\varepsilon}_{ij}. \qquad (5)$$

Напомним, что к достоинствам эндохронного подхода относятся: отсутствие понятия поверхности текучести; отсутствие разделения деформаций на упругую и неупругую составляющие; единообразие определяющих соотношений при нагрузке, нейтральном нагружении и разгрузке.

Материальные функции $\tau=\tau(\varepsilon,\varepsilon^{\bullet})$ и $g=g(\varepsilon,\varepsilon^{\bullet})$ определяются из экспериментов в зависимости от истории нагружения при различных скоростях деформирования исследуемого материала. В рамках теории упругопластических процессов и теории течения зависимость деформационного предела текучести материала $\bar{\tau}$ от интенсивности скорости деформирования $\varepsilon^{\bullet}$ для различных материалов обычно аппроксимируется одной из следующих функций: $\bar{\tau}=\tau_0\cdot\varepsilon^{\bullet}$, $\bar{\tau}=\tau_0+a\cdot\varepsilon^{\bullet}$, $\bar{\tau}=\tau_0\cdot(\varepsilon^{\bullet})^{\delta}$, $\bar{\tau}=\tau_0+a\cdot(\varepsilon^{\bullet})^{\delta}$, $\bar{\tau}=\tau_0\cdot\ln(1+a\cdot\varepsilon^{\bullet})$, $\bar{\tau}=\tau_0+a\cdot\ln(1+b\cdot\varepsilon^{\bullet})$.

Это связано с тем, что эксперименты по деформированию образцов различных материалов при изменении скорости деформирования в разных диапазонах скоростей, как правило, показывают увеличение предела текучести от скорости деформирования, иногда с выходом на асимптоту. В тех случаях, когда $\bar{\tau}$ – убывающая функция от $\varepsilon^{\bullet}$, применяют аппроксимацию вида $\bar{\tau}=\tau_0\cdot(1+\exp(-a\cdot\varepsilon^{\bullet}))$. Заметим, что все сказанное относится к скоростям деформирования не выше $\varepsilon^{\bullet}\sim1$ с$^{-1}$, то есть к квазистатическим нагружениям.

Предположим сейчас, что упрочнение материала в процессе неупругого деформирования не зависит от времени и истории нагружения, то есть $g=\text{const}$, а для параметра τ выберем аппроксимацию типа $\tau=\tau_0\cdot(\varepsilon^{\bullet})^{\delta}$, тогда соотношения (5) преобразуются и примут следующий вид:

$$\frac{\sigma^*_{ij}}{2G}+\frac{1}{2G}\frac{d\sigma^*_{ij}}{dt}\tau_0\cdot(\varepsilon^{\bullet})^{\delta-1}=$$
$$=\frac{d\varepsilon_{ij}}{dt}\tau_0\cdot(\varepsilon^{\bullet})^{\delta-1}+k\cdot\dot{\varepsilon}_{ij}. \qquad (6)$$

Для использования уравнений модели (6) требуется знать константы материала: G, K, τ_0, δ и g, а также функцию $\varphi(\xi)$. Для их определения достаточно провести опыты на кручение трубчатых образцов при трех разных скоростях деформирования и опыты на растяжение, сжатие и кручение с одинаковой скоростью деформирования.

Демонстрационный пример

Рассмотрим в рамках представленной модели (6) классическую задачу ползучести, когда $\sigma_{ij}=\text{const}$ и вид напряженного состояния не меняется. Тогда

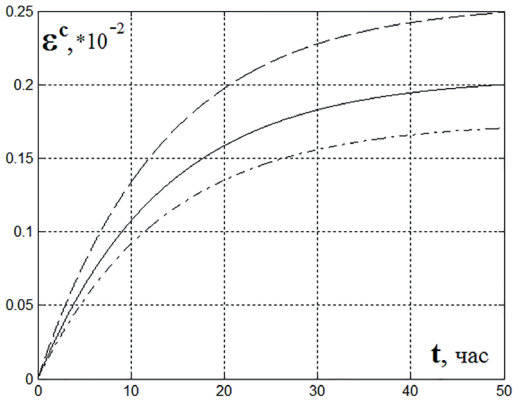
$$\xi=\text{const},\ \sigma^*_{ij}=\text{const},\ d\sigma^*_{ij}/dt=0,\ K\varepsilon_{ii}=\sigma_{ii},$$

$$\dot{\varepsilon}^c_{ij}=\dot{\varepsilon}_{ij}-\dot{\varepsilon}^e_{ij},\ \dot{\varepsilon}^e_{ij}=\dot{\sigma}_{ij}/E,$$

где $\dot{\varepsilon}^e_{ij}$, $\dot{\varepsilon}^c_{ij}$ – девиаторы тензоров упругой деформации и деформации ползучести, а E – модуль Юнга. Соотношения (6) тогда запишутся в виде

$$\frac{d\dot{\varepsilon}_{ij}}{dt}=\frac{1}{\tau_0\cdot(\varepsilon^{\bullet})^{\delta-1}}\cdot\left(\frac{\sigma^*_{ij}}{2G}-k\cdot\dot{\varepsilon}_{ij}\right). \qquad (7)$$

На рисунке представлены результаты расчета деформаций ползучести материала, выполненные по уравнениям (7) при одинаковой интенсивности напряжений при растяжении (пун-



Развитие деформаций ползучести во времени

ктирная линия), кручении (сплошная линия) и сжатии (штрихпунктирная линия). В расчетах было принято, что $2G = 190$ ГПа, $\sigma = 400$ МПа, $k = 0{,}01$, $\tau_0 = 3{,}26 \cdot 10^{-3}$, $\delta = 2{,}65 \cdot 10^{-2}$. Функция $\varphi(\xi)$ имела вид (2), где $k_1 = -0{,}11$ и $k_2 = 0{,}08$.

На рисунке отмечается «расщепление» кривых «деформация ползучести ~ время» в зависимости от вида напряженного состояния; проявление первой и второй стадий развития деформаций ползучести; отсутствие выхода графиков на горизонтальную асимптоту.

Геометрически нелинейный вариант эндохронной теории ползучести

Предложим сейчас по аналогии с вышеизложенным пунктом и согласно рекомендациям [9] геометрически нелинейный вариант определяющих соотношений для материалов, чувствительных к виду напряженного состояния:

$$\frac{\sigma^*_{ij}}{2G} r^{\bullet} + \frac{\alpha\tau}{2G} \overset{\circ}{\sigma}{}^*_{ij} = \tau \overset{\circ}{r}_{ij} + \frac{r_{ij}}{g+\alpha} r^{\bullet},\ K\varepsilon_{ii} = \sigma_{ii},$$

$$\tau = \tau(r, r^{\bullet}),\ g = g(r, r^{\bullet}),\ G = G(r, r^{\bullet}), \qquad (8)$$

$$\overset{\circ}{r}_{ij} = D_{ij} - (1-\alpha)\frac{\overset{\circ}{\sigma}_{ij}}{2G},\ \overset{\circ}{\varepsilon}_{ij} = D_{ij},\ \Omega_{ij} = R^{\bullet}_{ij} R^T_{ij},$$

$$\overset{\circ}{\sigma}_{ij} = \overset{\bullet}{\sigma}_{ij} + \sigma_{ij}\Omega_{ij} - \Omega_{ij}\sigma_{ij},\ \overset{\circ}{\varepsilon}_{ij} = \overset{\bullet}{\varepsilon}_{ij} + \varepsilon_{ij}\Omega_{ij} - \Omega_{ij}\varepsilon_{ij}.$$

Здесь $\overset{\circ}{\sigma}_{ij}$, $\overset{\circ}{\varepsilon}_{ij}$ – объективные производные девиаторов тензоров напряжений и деформаций соответственно, Ω_{ij} – тензор вихря, R_{ij} – ортогональный тензор поворота в полярном разложении градиента деформаций $F_{ij} = R_{ij} U_{ij}$, U_{ij} – симметричный правый тензор удлинения, $D_{ij} = (L_{ij} + L^T_{ij})/2$ – тензор скоростей деформаций, $L_{ij} = F^{\bullet}_{ij} F^{-1}_{ij}$ – скорость градиента деформаций, F_{ij} – градиент деформаций.

Группа уравнений (8) фактически учитывает и физическую, и геометрическую нелинейность в определяющих соотношениях неупругости и предлагается впервые. Подробный тщательный анализ применения этих уравнений для решения задач пластичности, ползучести и длительной прочности является самостоятельным исследованием, результаты которого будут опубликованы в дальнейшем.

Отметим лишь очевидные факты:

– соотношения $\overset{\circ}{\varepsilon}_{ij} = D_{ij}$ являются уравнениями для определения деформаций, то есть неголономной мерой деформации, порождаемой нейтральной коротационной производной

$$\varepsilon = R\left(\int R^T D\, R\, dt\right) R^T;$$

– при $\varphi(\xi) = 1$, $\alpha = 1$ и $2G = 1$ уравнения (8) принимают вид

$$\tau \overset{\circ}{\sigma}_{ij} + \sigma_{ij}\varepsilon^{\bullet} = \tau \overset{\circ}{\varepsilon}_{ij} + k\varepsilon_{ij}\varepsilon^{\bullet},\ K\varepsilon_{ii} = \sigma_{ii},\ \overset{\circ}{\varepsilon}_{ij} = D_{ij};$$

– при линейной зависимости деформационного предела текучести от скорости длины дуги деформации $\tau = k_0 \cdot \varepsilon^{\bullet}$ имеют структуру обобщенной модели Максвелла:

$$k_0 \overset{\circ}{\sigma}_{ij} + \sigma_{ij} = k_0 \overset{\circ}{\varepsilon}_{ij} + k\varepsilon_{ij},\ \overset{\circ}{\varepsilon}_{ij} = D_{ij};$$

– при отсутствии упрочнения, когда $k = 0$, и при $k_0 = 1$ простейшие геометрически нелинейные определяющие соотношения, учитывающие физическое время, запишутся в виде

$$\overset{\circ}{\sigma}_{ij} + \sigma_{ij} = \overset{\circ}{\varepsilon}_{ij},\ \overset{\circ}{\varepsilon}_{ij} = D_{ij}; \qquad (9)$$

– уже из уравнений (9) видно, что при одноосном растяжении фиксируются деформации не только в осевом, но и в других направлениях, что не проявляется в геометрически линейных теориях.

Выводы

Предложенные в данной статье варианты тензорно-параметрических эндохронных определяющих соотношений теории неупругости учитывают вид напряженного состояния материала, большие деформации и повороты.

На примере решения классической задачи ползучести продемонстрированы возможности и потенциал представленной теории для описания некоторых проявлений поведения деформаций ползучести.

Результаты анализа геометрически нелинейных определяющих соотношений и изучения деформаций ползучести на сложных траекториях нагружения будут представлены в дальнейших публикациях авторов.

Библиографический список

1. О ползучести упрочняющихся материалов с разными свойствами на растяжение и сжатие / А. Ф. Никитенко, О. В. Соснин, Н. Г. Торшенов, И. К. Шокало // Журнал прикладной механики и технической физики. 1971. № 2. С. 118–122.
2. *Белан-Гайко, В. Н.* Экспериментальное исследование деформируемости полимерных материалов при нестационарном пропорциональном нагру-

жении в условиях сложного напряженного состояния // Проблемы прочности. 1991. № 8. С. 61–64.
3. *Устинович, Р.* Влияние типа нагрузки на эволюцию анизотропии в условиях ползучести // Физика процессов деформации и разрушения и прогнозирование механического поведения материалов: труды XXXVI международного семинара «Актуальные проблемы прочности». Витебск. 2000. С. 595–600.
4. *Горев, В. В.* О построении уравнений ползучести для материалов с разными свойствами на растяжение и сжатие / В. В. Горев, В. В. Рубанов, О. В. Соснин // Журнал прикладной механики и технической физики. 1979. № 4. С. 121–128.
5. *Кадашевич, Ю. И.* Учет фазы подобия девиаторов в теории ползучести / Ю. И. Кадашевич, С. П. Помыткин // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1992. № 5. С. 129–133.
6. *Ломакин, Е. В.* Нелинейная деформация материалов, сопротивление которых зависит от вида напряжённого состояния // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1980. № 4. С. 48–55.
7. *Золочевский, А. А.* Определяющие уравнения нелинейного деформирования с тремя инвариантами напряженного состояния // Прикладная механика. Киев, 1990. Т. 26. № 3. С. 74–80.
8. *Кадашевич, Ю. И.* Эндохронная теория пластичности, учитывающая угол вида неупругой деформации / Ю. И. Кадашевич, А. Б. Мосолов // Доклады АН СССР. 1991. Т. 317. № 1. С. 53–57.
9. *Кадашевич, Ю. И.* Эндохронная теория ползучести, учитывающая конечные деформации / Ю. И. Кадашевич, С. П. Помыткин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки». 2004. № 26. С. 83–85.
10. *Новожилов, В. В.* О связи между напряжениями и деформациями в нелинейной упругой среде // Прикладная математика и механика. 1951. Т. 15. Вып. 2. С. 183–194.
11. *Работнов, Ю. И.* Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.

УДК 519.832

В. Н. Ассаул
кандидат технических наук
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

О МАТРИЧНОЙ ИГРЕ РАЗМЕРНОСТИ 3×3

В настоящей статье предлагается метод поиска оптимального плана матричной игры, не связанный с применением симплекс-метода, применительно к играм размерности 3×3, а также обсуждаются возможности его использования для задач большей размерности. С учетом методической составляющей представленного материала приведены примеры, иллюстрирующие методы поиска оптимальных стратегий.

***Ключевые слова**: смешанные стратегии, доминирование, цена игры.*

V. N. Assaul
PhD. Tech.
Saint-PetersburgStateUniversity of Aerospace Instrumentation

ON 3×3 DIMENSION MATRIX GAME

Alternative method to the simplex procedure is presented regarded to the 3x3 matrix game problem. Samples illustrating the presented approach to the search for optimal strategies are given and analysed.

***Keywords:** mixed strategies, domination, game value.*

При решении матричной игры двух игроков с нулевой суммой традиционно применяется метод Данцига, сводящий поиск оптимальных стратегий к решению пары двойственных задач [1]. Теорема фон Неймана [1] гарантирует существование оптимального решения рассматриваемой задачи в случае неотрицательности элементов платежной матрицы **A**:

$$\mathbf{A}=\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}.$$

Поскольку добавление ко всем элементам платежной матрицы одинакового слагаемого не влияет на оптимальные стратегии, обычно в качестве этого слагаемого выбирают модуль наименьшего отрицательного элемента матрицы (если таковой имеется). Перед переходом к решению пары двойственных задач платежную матрицу проверяют на наличие доминируемых строк и доминирующих столбцов. Если такие строки и столбцы удается найти, их вычеркивают, что уменьшает размерность платежной матрицы и облегчает решение пары двойственных задач.

Вместе с тем далеко не всегда поиск доминируемых стратегий (строк или столбцов) является простой задачей, особенно если расширить это понятие и считать доминируемыми неактивные, то есть отсутствующие в оптимальном плане стратегии. Поиск таких стратегий проще для платежных матриц небольшой размерности, поэтому рассмотрим сначала игру с платежной матрицей 2×2:

$$\mathbf{A}=\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}. \qquad (1)$$

Для матричной игры 2×2 наличие доминируемой строки или доминирующего столбца эквивалентно наличию седловой точки. В этом случае решение находится в чистых стратегиях, то есть каждому игроку выгодно постоянно делать один и тот же ход. Если предположить, что первый ход первого игрока делается с вероятностью x, а первый ход второго игрока – с вероятностью y, то математическое ожидание выигрыша первого игрока выразится формулой

$$M(x,y)=a_{11}\cdot xy+a_{12}\cdot x(1-y)+$$
$$+a_{21}\cdot(1-x)y+a_{22}\cdot(1-x)(1-y).$$

Это выражение можно с помощью элементарных преобразований привести к виду

$$M(x,y)=B\cdot(x-x^{*})(y-y^{*})+V, \qquad (2)$$

где

$$x^* = \frac{a_{22} - a_{11}}{a_{11} - a_{12} - a_{21} + a_{22}},$$
$$y^* = \frac{a_{22} - a_{12}}{a_{11} - a_{12} - a_{21} + a_{22}}, \quad (3)$$

$$B = a_{11} - a_{12} - a_{21} + a_{22},$$
$$V = \frac{a_{11} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{21}}{a_{11} - a_{12} - a_{21} + a_{22}}. \quad (4)$$

Можно показать, что условия $0 < x^* < 1$, $0 < y^* < 1$ равносильны условию отсутствия у платежной матрицы седловой точки. При выполнении этих условий векторы $\mathbf{P}(x^*, 1-x^*)$, $\mathbf{P}(x^*, 1-x^*)$ и $\mathbf{Q}(y^*, 1-y^*)$ представляют оптимальные стратегии игроков, а величина V будет равна цене игры. Формулу (4) для V можно переписать в более удобном для вычислений виде:

$$V = \frac{a_{11} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{21}}{(a_{11} + a_{22}) - (a_{12} + a_{21})} = \frac{\Delta}{\Delta_+}, \quad (5)$$

где Δ – определитель матрицы (1), а Δ_+ – тот же определитель, в котором действие умножения заменено на сложение.

В матрице (1) будет седловая точка, если, например, два наибольших элемента расположены на одной диагонали. Впрочем, найти седловую точку в платежной матрице любого порядка не составляет труда.

Если же хотя бы у одного из игроков число ходов превышает 2, то возможны ситуации, когда стратегии игроков смешиваются частично, то есть вектор оптимальных стратегий содержит и нулевые, и ненулевые компоненты. В этом случае ряд ходов не совершается игроком, поэтому соответствующие им строки (или столбцы), вообще говоря, могут быть вычеркнуты из платежной матрицы. Это уменьшает размерность задачи и облегчает ее решение. Вопрос в том, как определить эти ходы заранее, не решая матричной игры. Повторим, что в задаче с платежной матрицей 2×2 такая ситуация невозможна.

К указанным ранее выпадающим ходам игроков относятся доминируемые строки и доминирующие столбцы, определения которых хорошо известны [1, 2]. Однако такое доминирование не исчерпывает все возможные случаи. Действительно, в платежной матрице

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 3 & 1 & 0 \\ 1 & 5 & 6 \\ 4 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

нет доминируемых строк и столбцов, однако линейная комбинация второй и третьей строк $ae_1 + (1-a)e_2$, (где $0 \le \alpha \le 1$) при $\alpha \in [\frac{1}{5}, \frac{1}{3}]$ доминирует над первой строкой. Это значит, что такая комбинация второго и третьего ходов, называемая выпуклой, гарантирует первому игроку больший выигрыш, чем при первом ходе. Подобное совместное доминирование позволяет первому игроку вовсе отказаться от первого хода и вычеркнуть первую строку из матрицы **A**:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} 256 \\ 400 \end{pmatrix}.$$

Теперь из платежной матрицы можно вычеркнуть последний столбец, поскольку он доминирует над вторым. Получаем матрицу 2×2:

$$\mathbf{A}_2 = \begin{pmatrix} 25 \\ 40 \end{pmatrix},$$

в которой нет седловой точки, цена игры

$$V = \frac{2 \cdot 0 - 4 \cdot 5}{(2+0) - (4+5)} = \frac{20}{7},$$

а оптимальные стратегии

$$P(\frac{4}{7}, \frac{3}{7}),\ Q(\frac{5}{7}, \frac{2}{7}).$$

С учетом вычеркнутых строки и столбца получаем:

$$P(0, \frac{4}{7}, \frac{3}{7}),\ Q(\frac{5}{7}, \frac{2}{7}, 0).$$

Следует отметить, что выпуклая комбинация строк это не что иное, как смешанная стратегия, построенная на основе двух первых ходов первого игрока. Поскольку предполагается, что игра повторяется многократно, каждый из игроков вправе смешивать свои чистые стратегии (строки или столбцы), тем самым добавляя дополнительные строки либо столбцы в платежную матрицу.

Второй игрок может подобно первому игроку вычеркнуть из платежной матрицы столбец, если существует выпуклая комбинация других столбцов, доминируемая данным. Это будет совместное доминирование для столбцов.

В случае платежной матрицы с двумя строками либо с двумя столбцами решение может быть получено графическим способом (см., например, [2]). Если же у каждого из игроков есть как минимум три хода, рекомендуется использовать метод Данцига и симплекс-метод [3].

Рассмотрим платежную матрицу 3×3 и попробуем определить наличие доминируе-

мых стратегий, не прибегая к процедуре симплекс-метода. Найдем цены игры при условии, что каждый из игроков последовательно отказывается от одного из своих ходов. По сути это будут условные математические ожидания $M(x, y|x_i=0)$ и $M(x, y|y_j=0)$, $i=1, 2, 3$; $j=1, 2, 3$; $x=(x_1, x_2, x_3)$, $y=(y_1, y_2, y_3)$. Цена игры V при этом будет удовлетворять двойному неравенству:

$$\max_{i=1, 2, 3} M(x, y|x_i=0) \le V \le \min_{i=1, 2, 3} M(x, y|y_j=0). \quad (6)$$

Величины $V_-=\max_{i=1,2,3} M(x, y|x_i=0)$ и $V_+=\min_{i=1, 2, 3} M(x, y|y_j=0)$ являются аналогами нижней и верхней цены игры. При вычислении величин $M(x, y|x_i=0)$ и $M(x, y|y_j=0)$ рассматриваться будут матрицы размером 2×3 и 3×2, цены игры для которых найти несложно с учетом приведенных выше соображений. Поясним предлагаемую процедуру на примерах.

Пусть платежная матрица имеет вид

$$\mathbf{A}=\begin{pmatrix} 3 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 4 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}.$$

Очевидно, что данная матрица не имеет доминируемых строк и доминирующих столбцов. Кроме того, совместного доминирования в строках и столбцах также нет. Действительно, любое смешение первой и второй строк не будет доминировать над третьей, так как вторые элементы этих строк меньше второго элемента третьей строки. Первая и третья строки не могут доминировать над второй, поскольку третий элемент второй строки наибольший в столбце. Наконец, смешение второй и третьей строк не будет доминировать над первой, так как первый элемент первой строки больше других элементов в первом столбце. Аналогично проверяется отсутствие совместного доминирования столбцов, то есть никакое смешение столбцов не будет доминируемым по отношению к оставшемуся столбцу.

Найдем условные цены игры V_- и V_+, начнем со строк. Вычеркнем из платежной матрицы первую строку, получим матрицу $\mathbf{A}_1$:

$$\mathbf{A}_1=\begin{pmatrix} 2 & 0 & 4 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix}.$$

В этой матрице вычеркивается третий столбец, а цена игры оставшейся матрицы легко находится по формуле (5): $V_1=M(x, y|x_1=0)=4/3$. При вычеркивании второй строки матрицы $\mathbf{A}$ получаем матрицу $\mathbf{A}_2$:

$$\mathbf{A}_2=\begin{pmatrix} 3 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix},$$

в которой нет доминирования столбцов, однако один из столбцов может быть вычеркнут. Если вычеркнуть первый столбец, цена игры оставшейся матрицы будет равна 3 (в матрице есть седловая точка); если вычеркнуть второй столбец, цена игры будет 9/5, а без третьего столбца цена игры равна 5/3. Поскольку выбор столбцов осуществляет второй игрок, он откажется от третьего столбца, поскольку в этом случае цена игры минимальна. Таким образом,

$$V_2=M(x, y|x_2=0)=5/3.$$

Наконец, если в матрице $\mathbf{A}$ вычеркнуть третью строку, получим матрицу $\mathbf{A}_3$:

$$\mathbf{A}_3=\begin{pmatrix} 3 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 4 \end{pmatrix},$$

в которой вычеркивается первый доминирующий столбец, после чего находим:

$$V_3=M(x, y|x_3=0)=4/5.$$

Теперь начнем вычеркивать столбцы. Без первого столбца получаем матрицу $\mathbf{A}_4$:

$$\mathbf{A}_4=\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 4 \\ 2 & 3 \end{pmatrix},$$

в которой вычеркивается первая строка, а оставшаяся матрица имеет седловую точку и цену игры, равную 2. Таким образом,

$$V_4=M(x, y|y_1=0)=2.$$

Вычеркнем теперь из матрицы $\mathbf{A}$ второй столбец:

$$\mathbf{A}_5=\begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 2 & 4 \\ 1 & 3 \end{pmatrix}.$$

Здесь вычеркивается третья строка, а цена игры $V_5=M(x, y|y_2=0)=12/5$. Наконец, без третьего столбца имеем

$$\mathbf{A}_6=\begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 2 & 0 \\ 1 & 2 \end{pmatrix}.$$

После вычеркивания второй строки находим: $V_6=M(x, y|y_3=0)=5/3$. Далее,

$$V_-=\max(V_1, V_2, V_3)=5/3,\ V_+=\min(V_4, V_5, V_6)=5/3.$$

Мы видим, что $V_-=V_+$. Это означает, что цена игры $V=5/3$, то есть первому игроку выгодно отказаться от второго хода, а второму игроку – от третьего. Для получающейся в этом случае платежной матрицы

$$\tilde{\mathbf{A}}=\begin{pmatrix} 2 & 5 \\ 4 & 0 \end{pmatrix}$$

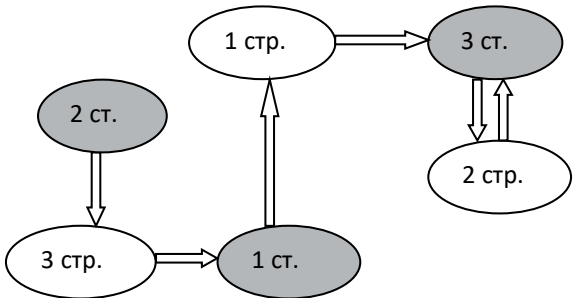


Рис. 1

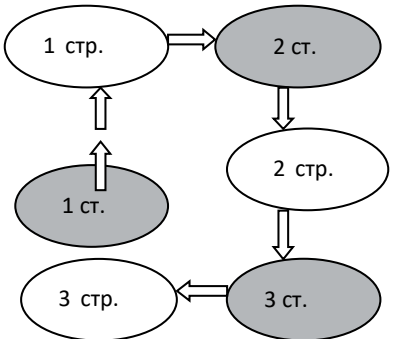


Рис. 2

нетрудно найти оптимальные стратегии по формулам (3)–(4): $P^*(1/3, 2/3)$, $Q^*(1/3, 2/3)$. С учетом вычеркнутых строк и столбцов имеем: $P^*(1/3, 0,2/3)$, $Q^*(1/3, 2/3,0)$, $V=5/3$, и матричная игра решена. Заметим, что нахождение промежуточных значений цены игры не представляло вычислительных трудностей, а их небольшое число (шесть) не заняло много времени. Вместе с тем мы избежали применения симплекс-метода.

Отметим также, что если заменить элементы a_{ij} матрицы **A** на вычисленные значения $M(x, y|x_i=0, y_j=0)$, то полученная платежная матрица будет иметь седловую точку в элементе, отвечающем вычеркиваемым строке и столбцу, то есть неактивным стратегиям.

Приведенный алгоритм допускает также наглядную графическую интерпретацию. Построим ориентированный граф, вершинами которого будут вычеркиваемые строки и столбцы, соединяемые дугами со столбцами и строками, которые вычеркиваются в каждом из рассматриваемых вариантов (см. рис. 1).

Так, например, в матрице $\mathbf{A}_1$, полученной из матрицы **A** вычеркиванием первой строки, вычеркивается третий столбец, что соответствует дуге, идущей из вершины «1 стр.» в вершину «3 ст.». Подобным образом проведены и все остальные дуги на рис. 1. Построенный граф имеет цикл из двух вершин «2 стр.» и «3 ст.», что означает, что отказ первого игрока от второго хода влечет отказ второго игрока от третьего хода, и наоборот. Таким образом, каждому из игроков выгодно отказаться от указанных ходов, что означает, что вторую строку и третий столбец можно вычеркнуть из платежной матрицы.

Рассмотрим теперь платежную матрицу

$$\mathbf{A}=\begin{pmatrix}3 & 1 & 0\\ 2 & 4 & 0\\ 0 & 1 & 6\end{pmatrix}.$$

Действуя так же, как и в предыдущем примере, находим:

$$V_1=M(x, y|x_1=0)=3/2,\ V_2=M(x, y|x_2=0)=3/4,$$
$$V_3=M(x, y|x_3=0)=4/5,$$
$$V_4=M(x, y|y_1=0)=8/3,\ V_5=M(x, y|y_2=0)=9/4,$$
$$V_5=M(x, y|y_3=0)=12/5.$$

Тогда

$$V_-=\max(3/2,3/4,4/5)=3/2,$$
$$V_+=\min(8/3,9/4,12/5)=9/4.$$

В данном случае мы имеем $V_- \le V \le V_+$, и для цены игры получаем оценку: $3/2 \le V \le 9/4$.

Поскольку $V_- \ne V_+$, вычеркиваемых строк и столбцов нет, и все стратегии игры активны, то есть имеет место случай полного смешения стратегий у каждого из игроков.

Графическая интерпретация для данной платежной матрицы с гамильтоновым контуром показана на рис. 2.

Метод Данцига в этом случае сводится к двум системам линейных алгебраических уравнений, решение которых проще, чем решение пары задач линейного программирования:

$$AX=E_1\,;\ AY=E_1, \qquad (7)$$

где E_1 – столбец из единиц.

Решения этих систем – векторы

$$\mathbf{X}^*(21/74,4/37,11/74),\ \mathbf{Y}^*(7/37, 8/37,5/37),$$

оптимальные стратегии игроков

$$P^*(7/20,2/5,1/4),\ Q^*(21/40,1/5,11/40),$$

а цена игры $V=37/20$.

Таким образом, имеется возможность решения матричной игры 3×3 без применения симплекс-метода. Предложенный способ позволяет подробно проанализировать внутреннюю структуру платежной матрицы, что имеет методическое значение в преподавании основ теории игр студентам экономических специальностей. Воз-

можен также подход, при котором сначала решаются системы уравнений (7), и в случае неотрицательности полученных решений сразу же находятся оптимальные стратегии и цена игры.

Если же в решении систем присутствуют отрицательные компоненты, это указывает на наличие совместного доминирования стратегий, или, другими словами, неполного смешения стратегий. Найти доминируемые (неактивные) стратегии можно, находя условные математические ожидания функции выигрыша (6). На вычеркиваемые строки и столбцы могут указывать и отрицательные решения системы (7).

Описанный метод может быть использован и для матричных игр большей размерности. В случае полного смешения стратегий системы уравнений (7) могут быть легко решены.

Если же смешение стратегий неполное, то при нахождении условных математических ожиданий, подобных (6), могут возникнуть сложности, когда в соответствующих матрицах нет явно выраженных доминирующих стратегий, и нахождение условных математических ожиданий становится громоздким.

Библиографический список

1. *Оуэн, Г.* Теория игр / Пер. с англ. 2-е. изд. М.: УРСС, 2004. 216 с.
2. *Краснов, М. Л.* Вся высшая математика: учебник / М. Л. Краснов, А. И. Киселев и др. Т. 5. 5-е изд. М.: Изд-во ЛКИ, 2011. 296 с.
3. *Комарницкая, О. И.* Элементы теории игр и теории графов. Л.: ЛИЭИ, 1989. 44 с.

УДК 531.383

А. М. Лестев
доктор физико-математических наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
М. В. Цыганков
инженер
АО «ГИРООПТИКА», Санкт-Петербург

О ВИБРОСТОЙКОСТИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Приводятся результаты исследования динамики чувствительного элемента (ЧЭ) микромеханического акселерометра (ММА) при поступательных и угловых колебаниях основания. На основании нелинейных дифференциальных уравнений движения ЧЭ ММА устанавливается возможность развития комбинационных резонансов и пространственной неустойчивости движения ЧЭ.

***Ключевые слова**: акселерометр микромеханический, вибростойкость, резонанс комбинационный, пространственная неустойчивость движения.*

A. M. Lestev
PhD. Phys.-Math., Professor
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
M. V. Tsygankov
Engineer
JSC «GYROOPTIKA», Saint-Petersburg

ABOUT A VIBRATION RESISTANCE OF THE MICROMECHANICAL ACCELEROMETERS

Results of studies of the micromechanical accelerometers sensing elements in linear and angular vibration of the base are given. Based on nonlinear diiferential equations of sensing elements motion the possibility of combination resonances development and motion space instability of sensing elements are determined.

***Keywords:** micromechanical accelerometers, vibration resistance, combination resonances, motion space instability.*

Актуальная проблема, возникающая при разработках инерциальных датчиков параметров движения – микромеханических гироскопов (ММГ) и акселерометров (ММА) – состоит в обеспечении стойкости к вибрационным воздействиям – вибростойкости. Под вибростойкостью понимается способность прибора сохранять метрологические характеристики в определенном диапазоне амплитуд и частот вибрационного воздействия [1].

Решение проблемы обеспечения вибростойкости микромеханических датчиков осложняется высокой добротностью колебательной системы ММГ и инерционной массы на упругом подвесе ММА [2]. Структурно-конструктивные и алгоритмические методы и технические решения обеспечения вибростойкости ММГ рассматривались в публикациях [3, 4]. Аналогичные технические решения могут быть применены при разработках ММА.

Вместе с конструктивно-технологическими и алгоритмическими методами обеспечения вибростойкости решение рассматриваемой проблемы связано с проведением исследований погрешностей ММА при вибрационных воздействиях и резонансных явлений в динамике ЧЭ приборов этого типа [5, 6, 7].

В данной работе рассматривается динамика ЧЭ ММА при поступательных и угловых колебаниях основания, анализируется возможность развития комбинационных резонансов и пространственной неустойчивости движения ЧЭ, нарушающих нормальный режим функционирования прибора.

Объектом исследований является микромеханический акселерометр осевого типа. Конструкция прибора была создана в АО «ГИРООПТИКА» на основе расчетов, выполненных с применением конечно-элементного метода.

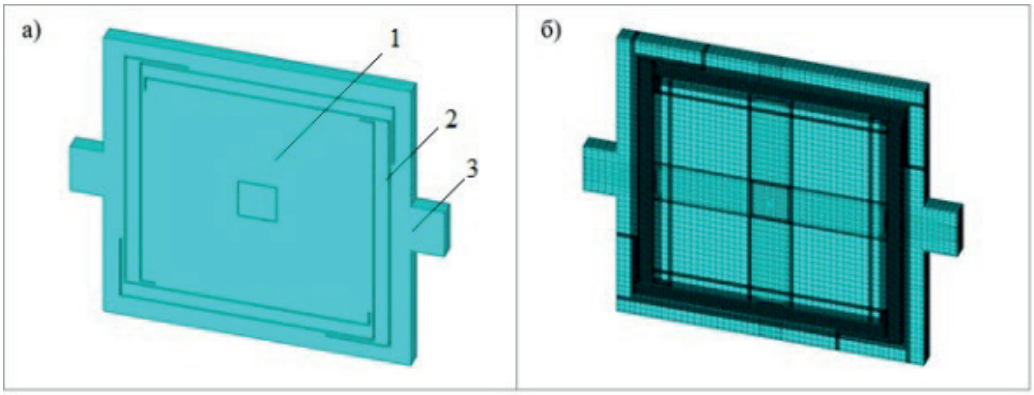


Рис. 1. Геометрическая (а) и конечно-элементная (б) модели ЧЭ ММА:
1 – инерционная масса; 2 – упругие элементы; 3 – опорная рамка

На рис. 1 приведены геометрическая и конечно-элементная модели ЧЭ ММА.

Для аналитического исследования динамики ММА приведем дифференциальные уравнения движения ЧЭ прибора. Будем предполагать, что корпус ММА установлен на основании, совершающем поступательные и угловые колебания. С основанием (корпус прибора) свяжем систему координат Ox,y,z с началом в центре упругого подвеса инерционной массы в положении статического равновесия ЧЭ.

Движение основания зададим проекциями $V_{ox},V_{oy},V_{oz}(V_{ox}=-V_x^o\sin\lambda_x t,(x,y,z))$ скорости начала координат O и проекциями $\Omega_x,\Omega_y,\Omega_z(\Omega_x=-\Omega_x^o\sin\nu_x t,(x,y,z))$ угловой скорости основания на эти оси. С инерционной массой ММА свяжем систему координат $Cx_1y_1z_1$ с началом в центре масс ЧЭ, ось x_1 которой направим вдоль оси чувствительности прибора. Положение инерционной массы относительно системы координат Ox,y,z определяется координатами x, y, z центра масс ЧЭ и углами α,β,γ (рис. 2).

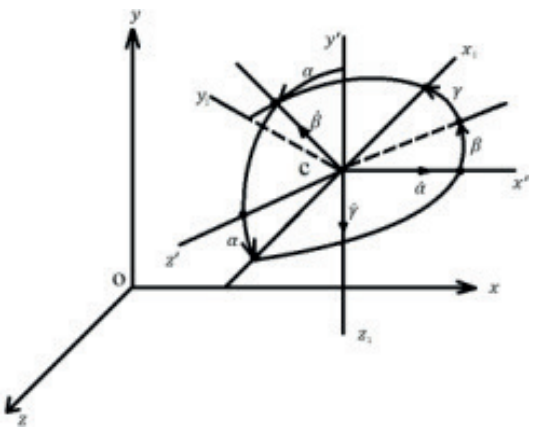


Рис. 2. Системы координат

Имея цель выяснить влияние нелинейных слагаемых в дифференциальных уравнениях движения ЧЭ ММА, примем, что центр масс ЧЭ совпадает с центром жесткости упругого подвеса ЧЭ. Обозначим через m массу ЧЭ ММА и через I_{x1},I_{y1},I_{z1} моменты инерции ЧЭ относительно осей x_1,y_1,z_1. Координаты x, y, z и углы α,β,γ будем считать малыми величинами.

Используя уравнения Лагранжа второго рода, дифференциальные уравнения движения ЧЭ ММА, сохранив в них слагаемые второго порядка малости, запишем в виде

$$\ddot{\alpha}+n_\alpha^2\alpha=-\dot{\Omega}_x-2h_\alpha\dot{\alpha}+Q_\alpha,$$
$$\ddot{\beta}+n_\beta^2\beta=-\dot{\Omega}_y-2h_\beta\dot{\beta}+Q_\beta,$$
$$\ddot{\gamma}+n_\gamma^2\gamma=-\dot{\Omega}_z-2h_\gamma\dot{\gamma}+Q_\gamma,$$

$$\ddot{x}+n_x^2x=-\dot{V}_x-2h_x\dot{x}+Q_x,(x,y,z), \qquad (1)$$

$$Q_\alpha=-\frac{1}{I_{x1}}\frac{d}{dt}\{I_{x1}[(\dot{\beta}+\Omega_y)\gamma-\Omega_z\beta]-[I_{y1}(\dot{\beta}+\Omega_y)\gamma+$$
$$+I_{z1}(\dot{\gamma}+\Omega_z)\beta]+m[(\dot{z}+V_{oz})y-(\dot{y}+V_{oy})z]\}+$$
$$+\frac{I_{y1}}{I_{x1}}(\dot{\beta}+\Omega_y)\Omega_z-\frac{I_z}{I_x}(\dot{\gamma}+\Omega_z)\Omega_y,$$
$$Q_\beta=-\frac{1}{I_{y1}}\frac{d}{dt}\{I_{x1}(\dot{\alpha}+\Omega_x)\gamma-I_{y1}[(\dot{\alpha}+\Omega_x)\gamma-\alpha\Omega_z]+$$
$$+m[(\dot{x}+V_{ox})z-(\dot{z}+V_{oz})x]\}-\frac{I_{x1}}{I_{y1}}(\dot{\alpha}+\Omega_x)\Omega_z+$$
$$+\frac{I_{z1}}{I_{y1}}(\dot{\alpha}+\Omega_x)(\dot{\gamma}+\Omega_z),$$
$$Q_\gamma=-\frac{1}{I_{z1}}\frac{d}{dt}\{I_{z1}[(\dot{\alpha}+\Omega_x)\beta-\Omega_y\alpha]+m[(\dot{x}+V_{ox})y-$$
$$-(\dot{y}+V_{oy})x]\}+\frac{I_{x1}-I_{y1}}{I_{z1}}(\dot{\alpha}+\Omega_x)(\dot{\beta}+\Omega_y),$$

$$Q_x = -\frac{d}{dt}[(\dot{\beta}+\Omega_y)z-(\dot{\gamma}+\Omega_z)y]+$$
$$+[(\dot{y}+V_{oy})(\dot{\gamma}+\Omega_z)-(\dot{z}+V_{oz})(\dot{\beta}+\Omega_y)],$$

$$Q_y = -\frac{d}{dt}[(\dot{\gamma}+\Omega_z)x-(\dot{\alpha}+\Omega_x)z]+[(\dot{z}+V_{oz})(\dot{\alpha}+\Omega_x)-$$
$$-(\dot{x}+V_{ox})(\dot{\gamma}+\Omega_z)],$$
$$Q_y = -\frac{d}{dt}[(\dot{\alpha}+\Omega_x)y-(\dot{\beta}+\Omega_y)x]+[(\dot{x}+V_{ox})(\dot{\beta}+\Omega_y)-$$
$$-(\dot{y}+V_{oy})(\dot{\alpha}+\Omega_x)],$$
$$n_\alpha^2=\frac{C_\alpha}{I_{x1}}, n_\beta^2=\frac{C_\beta}{I_{y1}}, n_\gamma^2=\frac{C_\gamma}{I_{z1}},\ldots,2h_\alpha=\frac{\mu_\alpha}{I_{x1}},$$
$$2h_\beta=\frac{\mu_\beta}{I_{y1}}, 2h_\gamma=\frac{\mu_\gamma}{I_{z1}},\ldots,2h_z=\frac{\mu_z}{m}.$$

В уравнениях (1) $C_\alpha, C_\beta, C_\gamma, C_z, \mu_\alpha, \mu_\beta, \mu_\gamma, \mu_z$ – коэффициенты жесткости упругого подвеса и коэффициенты демпфирования.

Основываясь на уравнениях (1), рассмотрим движение ЧЭ ММА в условиях одного из характерных комбинационных резонансов при поступательных и угловых колебаниях основания прибора и покажем возможность развития комбинационного резонанса и пространственной неустойчивости движения ЧЭ ММА. Примем, что основание совершает поступательные колебания вдоль оси Z ($V_{oz}=-V_z^o\sin\lambda_z t$) и угловые колебания относительно осей X и Y ($\Omega_x=-\Omega_x^o\sin\nu_x t, \Omega_y=\sin\nu_y t$). Рассмотрим возможность развития комбинационных резонансов при выполнении соотношений

$$n_\alpha - n_y \approx \lambda_z, n_\beta - n_x \approx \lambda_z,$$
$$n_\alpha - n_\gamma \approx \nu_y, n_\beta - n_\gamma \approx \nu_x, \nu_x - \nu_y \approx n_\gamma.$$

Введем расстройки частот в соответствии с выражениями

$$n_\alpha^2=(n_\alpha^o)^2+2\varepsilon_\alpha n_\alpha,\ n_\beta^2=(n_\beta^o)^2+2\varepsilon_\beta n_\beta,$$
$$n_\gamma^2=(n_\gamma^o)^2+2\varepsilon_\gamma n_\gamma,\ n_x^2=(n_x^o)^2+2\varepsilon_x n_x,$$
$$n_y^2=(n_y^o)^2+2\varepsilon_y n_y,$$

и положим

$$n_\alpha^o - n_y^o=\lambda_z,\ n_\beta^o - n_x^o=\lambda_z,\ n_\alpha^o - n_\gamma^o=\nu_z,$$
$$n_\beta^o - n_\gamma^o=\nu_x, \nu_x-\nu_y=n_\gamma^o.$$

Решение уравнений (1) будем находить, используя метод медленно меняющихся коэффициентов [8] в виде

$$\alpha=a_\alpha\cos n_\alpha^o t+b_\alpha\sin n_\alpha^o t+q_\alpha\cos\nu_x t,$$
$$q_\alpha=\nu_x\Omega_x^o[(n_\alpha^o)^2-\nu_x^2]^{-1},$$
$$\beta=a_\beta\cos n_\beta^o t+b_\beta\sin n_\beta^o t+q_\beta\cos\nu_y t,$$
$$q_\beta=\nu_y\Omega_y^o[(n_\beta^o)^2-\nu_y^2]^{-1},$$
$$\gamma=a_\gamma\cos n_\gamma^o t+b_\gamma\sin n_\gamma^o t,\ x=a_x\cos n_x^o t+b_x\sin n_x^o t,$$
$$y=a_y\cos n_y^o t+b_x\sin n_y^o t,$$
$$z=a_z\cos n_z t+b_z\sin n_z t+q_z\cos\lambda_z t,$$
$$q_z=\lambda_z V_z^o[n_z^2-\lambda_z^2]^{-1}. \qquad (2)$$

В выражениях (2) функции $a_\alpha, b_\alpha, a_\beta, \ldots, b_z$ считаются медленно меняющимися функциями времени, удовлетворяющими дополнительным условиям, заключающимся в том, что первые производные по времени от α, β,...,z имеют такой же вид, как при $a_\alpha, b_\alpha, a_\beta, \ldots, b_z$ постоянных. Подставляя выражения (2) в уравнения (1), решая полученные уравнения относительно $\dot{a}_\alpha, \dot{b}_\alpha, \dot{a}_\beta, \ldots, \dot{b}_z$ совместно с уравнениями, налагающими дополнительные условия на функции α, β,...,z относительно их производных по времени и усредняя правые части по времени, придем к следующей системе уравнений, записанных в виде

$$\dot{X}=AX+C, \qquad (3)$$
$$X=\|\,a_\alpha, b_\alpha, a_\beta, b_\beta, a_\gamma, b_\gamma, a_x, b_x, a_y, b_y, a_z, b_z\,\|^{\mathrm{T}},$$

где T – символ транспонирования.

Отличные от нуля элементы матрицы $A=\|\,a_{i,j}\,\|$ и вектора $C=\|\,C_{i,j}\,\|$ $i,j=1,2,\ldots,12$ равны:

$$a_{1,1}=-h_\alpha,\ a_{1,2}=\varepsilon_\alpha,\ a_{1,6}=A_\gamma,\ a_{2,2}=-\varepsilon_\alpha,\ a_{2,1}=-h_\alpha,$$
$$a_{2,5}=-A_\gamma, a_{2,9}=-A_\gamma, a_{3,3}=-h_\beta,\ a_{3,4}=\varepsilon_\beta,\ a_{3,6}=B_\gamma,$$
$$a_{4,3}=-\varepsilon_\beta,\ a_{4,4}=-h_\beta,\ a_{4,5}=-B_\gamma,\ a_{5,2}=C_\gamma,\ a_{5,4}=D_\gamma,$$
$$a_{5,5}=-h_\gamma,\ a_{5,6}=\varepsilon_\gamma,\ a_{6,1}=-C_\gamma,\ a_{6,3}=-D_\gamma,$$
$$a_{6,5}=-\varepsilon_\gamma,\ a_{6,6}=-h_\gamma,\ a_{7,4}=A_\beta,\ a_{7,7}=-h_x,\ a_{7,8}=\varepsilon_x,$$
$$a_{8,3}=-A_\beta,\ a_{8,7}=-\varepsilon_x,\ a_{8,8}=-h_x,\ a_{9,2}=A_\alpha,$$
$$a_{9,9}=-h_y,\ a_{9,10}=\varepsilon_y,\ a_{10,1}=-A_\alpha,\ a_{10,9}=-\varepsilon_y,$$
$$a_{10,10}=-h_y, a_{11,11}=a_{11,12}=-h_z,$$
$$C_{6,1}=-\frac{1}{4n_\gamma^o}[\frac{I_{y1}+I_{z1}+I_{x1}}{I_{z1}}q_\alpha q_\beta\nu_x\nu_y-\frac{I_{y1}-I_{x1}}{I_{z1}}\times$$
$$\times\Omega_y^o(\Omega_x^o-q_\alpha\nu_x)-q_\alpha q_\beta\nu_x^2+q_\beta\Omega_x^o\nu_x+q_\alpha\Omega_y^o\nu_y],$$
$$A_y=\frac{1}{4n_\alpha^o}\frac{m}{I_{x1}}(q_z n_y^2+V_z^o n_y-V_z^o\lambda_z-q_z\lambda_z^2),$$
$$A_\gamma=-\frac{1}{4n_\alpha^o}\frac{1}{I_{y1}}\left\{\begin{array}{c}(I_{x1}+I_{z1}-I_{y1})[\Omega_y^o n_\gamma^o+\\+q_\beta\nu_y(n_\gamma^o+\nu_y)]-(I_{x1}-I_{z1})\Omega_y^o\nu_y\end{array}\right\},$$
$$B_\gamma=\frac{1}{4n_\beta^o}\frac{1}{I_{y1}}[(I_{x1}+I_{z1}+I_{y1})n_\gamma^o-(I_{x1}-I_{y1})\nu_x]\times$$
$$\times(\Omega_x^o+q_\alpha\nu_x),$$

$$C_\gamma = -\frac{n_\alpha^o}{4n_\gamma^o}\frac{I_{y1}+I_{z1}-I_{x1}}{I_{z1}}(\Omega_y^o - q_\beta \nu_y) +$$

$$+\frac{1}{4n_\gamma^o}(\Omega_y^o \nu_y - (n_\alpha^o)^2 q_\beta),$$

$$D_\gamma = \frac{1}{4n_\gamma^o}(\frac{I_{y1}+I_{z1}-I_{x1}}{I_{z1}} n_\beta^o - \nu_x)(\Omega_x^o + q_\alpha \nu_x),$$

$$A_\beta = \frac{n_\beta^o}{4n_x^o}(V_z^o + 2q_z\lambda_z - n_\beta q_z), A_\alpha =$$

$$= -\frac{n_\alpha^o}{4n_y^o}(V_z^o + 2q_z\lambda_z - n_\alpha^o q_z).$$

Если параметры колебаний основания не приводят к выполнению рассматриваемых резонансных соотношений, ЧЭ ММА совершает устойчивые гармонические колебания вдоль оси Z и угловые колебания относительно осей X^I и Y^{II} с пренебрежимо малыми амплитудами. При выполнении соотношений комбинационного резонанса режим колебаний ЧЭ перестраивается, возбуждаются колебания вдоль осей X и Y и угловые колебания относительно оси Z_1, параметры которых определяются частным решением уравнений (3).

В зависимости от параметров ММА и параметров колебаний основания стационарное движение ЧЭ ММА может быть устойчивым (при выполнении условий Гурвица) или неустойчивым (условия устойчивости Гурвица не выполняются). В первом случае амплитуды колебаний ЧЭ вдоль осей X и Y и относительно оси Z ограничены, но могут достигать значений, нарушающих нормальный режим функционирования прибора. Во втором случае стационарное движение ЧЭ ММА неустойчиво, и развивается явление пространственной неустойчивости [9] колебаний ЧЭ ММА на упругом подвесе.

В обоих случаях прибор не удовлетворяет требованиям вибростойкости. Физическая причина пространственной неустойчивости объясняется нелинейными слагаемыми в дифференциальных уравнениях движения ЧЭ ММА.

Таким образом, установлена возможность нарушения вибростойкости ММА в условиях комбинационного резонанса при вибрационных воздействиях, вызванных колебаниями основания прибора. Аналогичные явления наблюдаются при иных соотношениях между собственными частотами ЧЭ ММА на упругом подвесе и частотами вибрации основания. Практическая значимость результатов исследования комбинационных резонансов состоит в том, что они позволяют на этапе проектирования прибора предвидеть развитие нежелательных явлений в динамике ЧЭ ММА и производить выбор параметров прибора так, чтобы устранить их появление.

Библиографический список

1. *Коновалов, С. Ф.* Теория виброустойчивости акселерометров // М.: Машиностр., 1991. 272 с.
2. Капсулированные микромеханические гироскопы и акселерометры для цифровых систем навигации и управления / И. В. Попова, А. М. Лестев, А. А. Семенов и др. // Гироскопия и навигация. № 3(62). 2008. С. 27–36.
3. *Евстифеев, М. И.* Вопросы обеспечения стойкости микромеханических гироскопов при механических воздействиях / М.И. Евстифеев, И. Б. Челпаков // Гироскопия и навигация. № 1(80). 2013. С. 119–133.
4. *Евстифеев, М. И.* Методы повышения стойкости микромеханических гироскопов к механическим воздействиям / М. И. Евстифеев, Д. П. Елисеев, И. Б. Челпаков // Гироскопия и навигация. № 4(87). 2014. С. 56–68.
5. *Zhang, W.* Tuning the dynamic behavior of parametric resonans in a micromechanical oscillators / W. Zhang, R. Baskaran, K. L. Turner // Applied physics letters. 2003. V.82. № 1. P. 130–132.
6. *Распопов, В. Я.* Влияние трехкомпонентной вибрации на осевой микромеханический акселерометр / В. Я. Распопов, В. В. Турчанинов, Ю. В. Иванов // Датчики и системы. № 8. 2009. С. 63–65.
7. *Лестев, А. М.* О вибрационной погрешности маятникового микромеханического акселерометра / А. М. Лестев, М. В. Федоров // Гироскопия и навигация. № 4(75). 2011. С. 94–98.
8. *Бутенин, Н. В.* Введение в теорию нелинейных колебаний / Н. В. Бутенин, Ю. Н. Неймарк, Н. А. Фуфаев. М.: Наука, 1987. 384 с.
9. *Ганиев, Р. Ф.* Колебания твердых тел / Р. Ф. Ганиев, В. О. Кононенко. М.: Наука, 1976. 432 с.

УДК 535.32

Е. Н. Котликов*
доктор физико-математических наук, профессор
Н. П. Лавровская*
кандидат физико-математических наук, доцент
Ю. Н. Царев*
кандидат физико-математических наук, доцент
А. М. Семенцова*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ МОНОКРИСТАЛЛОВ ZNSE В ДИАПАЗОНЕ 1–20 МКМ*

В работе описана методика определения оптических констант материалов проходной оптики. Метод базируется на коррекции спектров отражения и пропускания на поглощение. В качестве иллюстрации метода определены оптические константы селенида цинка в диапазоне 1,3–20 мкм. Установлены показатели преломления и коэффициенты экстинкции CVD-ZnSe в диапазоне длин волн 1,3–20,0 мкм.

***Ключевые слова**: спектры, отражение, пропускание, поглощение, коррекция спектров, показатели преломления, коэффициенты экстинкции.*

***Работа выполнена при финансировании в рамках государственного задания 3.8420.2017/БЧ.*

E. N. Kotlikov*
PhD. Phys.-Math., Professor
N. P. Lavrovskaya*
PhD. Phys.-Math., Associate Professor
Yu. N. Tzarev*
PhD. Phys.-Math., Associate Professor
A. M. Sementsova*
Postgraduate Student
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE DETERMINATION OF OPTICAL CONSTANTS OF MONOCRYSTALS OF ZNSE IN THE RANGE OF 1–20 MICRONS*

The method of determination of optical constants for the materials of passing optics is described in this work. The method is based on the correction of the reflection and transmission spectra with due regard for absorption. As an illustration of the method, the optical constants of zinc selenide in the range 1.3 -20 μm are determined. Refractive indexes and coefficients of the extinction CVD-ZnSe were also determined in the wavelength range 1.3–20.0 μm.

***Keywords:** spectra, reflection, transmission, absorption, correction of the spectra, refractive indices, coefficients of the extinction.*

**The work was carried out with funding under the government assignment 3.8420.2017/ БЧ.*

В работе исследуются два типа оптического ZnSe: *CVD*-ZnSe, полученный с помощью процесса химических реакций (разложения или восстановления газообразных химических соединений) и *PVD*-ZnSe (керамика ПО4), полученный с помощью процесса сублимации – конденсации [1–3]. Селенид цинка прозрачен до 15–18 мкм, далее он начинает поглощать, однако широко используется в спектроскопии. Оптические константы (ОК) селенида цинка в справоч-

никах, как правило, ограничены диапазоном 0,5–14 мкм [4].

Рассмотрим методику нахождения ОК в областях с поглощением. Нахождение n и k, являющихся действительной и мнимой частями комплексного показателя преломления $\tilde{n}(\lambda) = n - ik$ [5], в области полос поглощения затруднительно методом, описанным ранее. Число неизвестных больше числа уравнений в спектрах, аналитические методы решения отсутствуют, а численные методы дают неоднозначные результаты.

В работе [6] предложен спектрофотометрический метод, позволяющий находить оптические константы материалов при наличии поглощения в них. Метод базируется на коррекции спектров на поглощение с последующим определением оптических констант по спектрам, в которых отсутствует поглощение, но остается дисперсионная зависимость коэффициента преломления от длины волны.

Рассмотрим методику нахождения оптических констант при наличии поглощения. Пропускание $T(\lambda)$, отражение $R(\lambda)$ и поглощение $A(\lambda)$ связаны законом сохранения энергии $1 = T(\lambda) + R(\lambda) + A(\lambda)$. Энергия является аддитивной величиной. В силу этого можно разделить поглощение A на две части. Первая – это часть энергии, которая теряется в пропускании ($A_T(\lambda)$), вторая ($A_R(\lambda)$) – в отражении:

$$A = 1 - R(\lambda) - T(\lambda) = A_R(\lambda) + A_T(\lambda). \qquad (1)$$

Уравнения, связывающие спектры отражения (или пропускания) с поглощением и спектры без поглощения в подложке, можно записать в виде [6]

$$\begin{aligned} A_R(\lambda) &= R_1 - R = f_R A, \\ A_T(\lambda) &= T_1 - T = f_T A, \end{aligned} \qquad (2)$$

где $R = R(\lambda)$ и $T = T(\lambda)$ – спектры отражения и пропускания подложки с поглощением, R_1 и T_1 – спектры отражения и пропускания подложки без поглощения, f_R и f_T – функции коррекции спектров, которые определяют долю поглощения в отражении или пропускании. Уравнения (2) позволяют найти скорректированные на поглощение спектры R_1 и T_1.

Все введенные параметры могут быть получены с использованием модели поглощающей подложки. Рассмотрим плоскопараллельную пластину с коэффициентом преломления n_2 и толщиной d. Коэффициент преломления пластины n_2, так же как и коэффициент экстинкции k (или коэффициент поглощения α), в общем случае зависят от длины волны λ. Окружающая среда – воздух, для которого коэффициент преломления $n_1 = 1$.

Для нахождения T, R, $A_T(\lambda)$ и $A_R(\lambda)$ использовался рекуррентный метод [8]. Интерференцией света, отраженной от поверхностей пластины, пренебрегаем. Суммирование прошедших и отраженных пучков с учетом поглощения дает соотношение

$$R = R_{12} + \frac{[T_{12}^2 R_{12} \exp(-2\alpha d)]}{[1 - R_{12}^2 \exp(-2\alpha d)]}. \qquad (3)$$

Аналогичные уравнения были получены и для пропускания:

$$T = [T_{12}^2 \exp(-\alpha d)] / [1 - R_{12}^2 \exp(-2\alpha d)]. \qquad (4)$$

Анализ уравнений (3–4) в общем виде затруднителен. В дальнейшем будем анализировать численные решения этих уравнений. Для RT-спектров нами будут найдены скорректированные на поглощение спектры, которые обозначим R_1 и T_1.

Из (1) и (2) следует

$$\begin{aligned} f_R &= (R_1 - R) / A; \\ f_T &= (T_1 - T) / A. \end{aligned} \qquad (5)$$

При расчете функций коррекции поглощение A бралось конечным, чтобы избежать неопределенности 0/0. Численные расчеты RT-спектров, спектров поглощения A, $A_T(\lambda)$ и $A_R(\lambda)$, функций коррекции f_R и f_T проводились с помощью программы *Film Manager* [7], в которой предусмотрен расчет спектров подложки конечной толщины при заданных значениях коэффициента экстинкции k (или поглощения α) и показателя преломления n_2.

На рис. 1 (кривая 1) приведены рассчитанные значения полного поглощения A для выбранной модели в зависимости от коэффициента экстинкции k с помощью программы *Film Manager*. Длина волны максимума поглощения задавалась равной 20 мкм. При небольших значениях поглощения A ход графиков для различных значений коэффициента преломления пленки n_2 практически одинаков. С ростом k (или α) кривые A определяются отражением от поверхности r_0, т. е. $R_1 = 1 - r_0 = 0{,}17$. Это связано с тем, что все проходящее излучение поглощается в пластине и не отражается от второй поверхности [5, 8].

Уравнения (5) позволяют найти скорректированные на поглощение спектры R_1 и T_1.

$$R_1 = A_R(\lambda) + R = f_R A + R, \qquad (6)$$

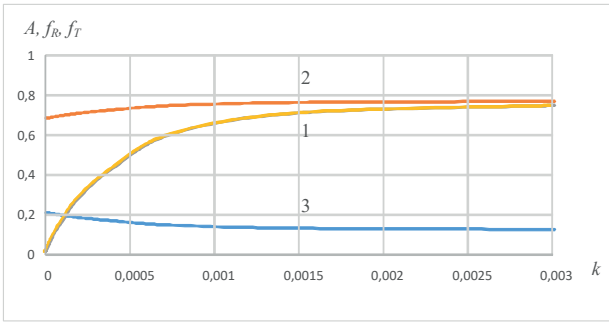


Рис. 1. Кривая 1 – поглощение A, кривая 2 – функция коррекции f_T, кривая 3 – функция коррекции f_R

$$T_1 = A_T(\lambda) + T = f_T A + T. \quad (7)$$

Для определения погрешности метода (D_R и D_T) рассчитывается разность скорректированного спектра и исходного, т. е.

$$\Delta_R = R_1 - (A_R(\lambda) + R), \quad (8)$$

$$\Delta_T = T_1 - (A_T(\lambda) + T). \quad (9)$$

Явный вид аналитического решения для поглощения $A = 1 - R - T$ можно получить из уравнений (3–4), но решение достаточно громоздкое для анализа. Более простой и наглядный путь – найти численно зависимость k от A с использованием программы *Film Manager* [7]. Результаты расчета приведены на рис. 1. Из результатов численного расчета можно найти значение k как функции A.

После коррекции спектров пропускания и отражения подложки на поглощение можно использовать уравнение, связывающее пропускание с коэффициентом преломления подложки n_S [8]:

$$T = [1 - \left(\frac{1-n_s}{1+n_s}\right)^2] / [1 + \left(\frac{1-n_s}{1+n_s}\right)^2] \quad (10)$$

Для нахождения значений k или α можно использовать только уравнение (4), поскольку спектры пропускания определяются с большей точностью, чем спектры отражения. Его решение относительно α имеет вид:

$$\alpha = \frac{-\{\ln[(-T_{12}^2 + \sqrt{(T_{12}^4 + R_{12}^2 T^2)}) / (2R_{12}^2 T)]\}}{d}. \quad (11)$$

где T – экспериментальное значение пропускания подложки, определяемое по спектру, T_{12} и R_{12} определяются по формулам (1, 2) и по измеренному значению коэффициента преломления подложки, полученному из спектров с использованием известных формул [5] $R_{12} = R_{21} = [(n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)]^2$, $T_{12} = T_{21} = 1 - R_{12}$.

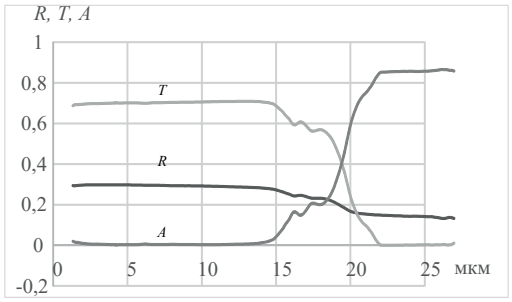


Рис. 2. Экспериментальные данные CVD-ZnSe: R – спектр отражения, T – спектр пропускания, A – спектр поглощения

В настоящей работе исследовали два типа оптического ZnSe: *CVD*-ZnSe, полученный с помощью процесса химических реакций (3 образца), и *PVD*-ZnSe (керамика ПО4), полученный с помощью процесса сублимации – конденсации (3 образца) [9]. Для измерения спектров пропускания и отражения материалов был использован программно-аппаратный комплекс – фурье-спектрофотометр ФСМ-1201.

На рис. 2 приведены экспериментальные спектры *CVD*-ZnSe, а именно спектры отражения R, пропускания T и поглощения A в диапазоне спектра до 25 мкм. Поскольку реально *CVD*-ZnSe пропускает только до 20 мкм, его спектральные характеристики исследовались именно в этом диапазоне.

Полученные спектры корректировались на поглощение по описанной выше методике с использованием формул (6) и (7). На рис. 3 приведены скорректированные на поглощение спектры R и T:

Далее, на основании скорректированных значений R и T находились показатели преломления. Исследуемые образцы селенида цинка имели одинаковые значения спектров пропу-

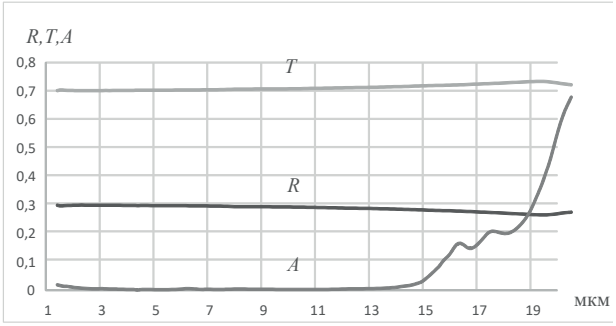


Рис. 3. Скорректированные на поглощение A спектры: отражения R и пропускания T

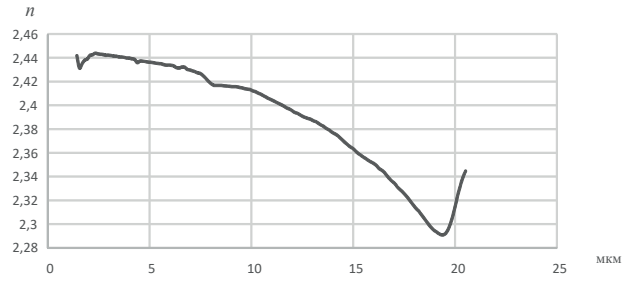


Рис. 4. Показатель преломления CVD-ZnSe от длины волны

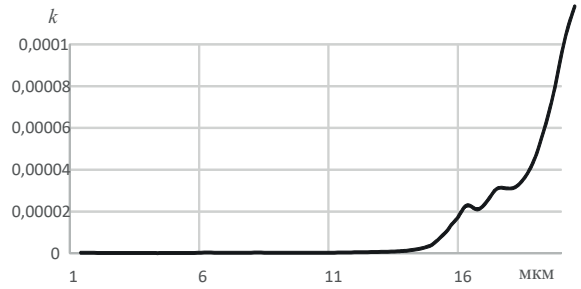


Рис. 5. Коэффициент экстинкции CVD-ZnSe в диапазоне от 1,5 до 20 мкм

скания и отражения. Результаты расчета коэффициента преломления *CVD*-ZnSe представлены на рис. 4.

Рассчитав коэффициент поглощения (где d – геометрическая толщина пластины, равная 0,4 мм) и зная коэффициент преломления материала, мы получили коэффициент экстинкции k и коэффициент поглощения α. Рассчитанные k *CVD*-ZnSe приведены на рис. 5.

Полученные данные соответствуют литературным данным [4, 8].

Предложена методика определения оптических констант материалов проходной оптики, обладающих поглощением. Методика базируется на коррекции спектров отражения и пропускания на поглощение. Проведен анализ возможностей методики и показано, что ее можно с высокой точностью применять к разным материалам. Для иллюстрации метода исследованы оптические константы селенида цинка в диапазоне 1,3–20 мкм. Найдены показатели преломления и коэффициенты экстинкции *CVD*-ZnSe в диапазоне длин волн 1,3–20,0 мкм.

Библиографический список

1. *Дунаев, А. А.* Свойства и оптическое применение поликристаллического селенида цинка, полученного физическим осаждением из газовой фазы / А. А. Дунаев, И. Л. Егорова // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 3. С. 449–456.
2. *Гаврищук, Е. М.* Получение высокочистого селенида цинка для ИК-оптики: автореф. дис. док. хим. наук: 02.00.19. Нижний Новгород, 2000. 52 с.
3. *Постнова, Л. И.* Эпитаксия селенида цинка на пористом кремнии/ Л. И. Постнова, В. И. Левченко, В. П. Бондаренко. Минск: ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», 2015. С. 100–102.
4. *Абильсиитов, Г. А.* Технологические лазеры: справ. М.: Машиностроение, 1991. Т. 2. 432 с.
5. *Борн, М.* Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф; пер. с англ. под ред. Г. П. Мотулевич. М.: Наука, 1970. 856 с.
6. *Котликов, Е. Н.* Спектрофотометрический метод определения оптических констант материалов // Оптический журнал. СПНИУ ИТМО, 2016. Т. 83. № 2. С. 61–67.
7. *Котликов, Е. Н.* Программа синтеза и анализа интерференционных покрытий «Film Manager» / Е. Н. Котликов, Ю. А. Новикова, И. И. Коваленко // Информационно-управляющие системы. 2015. № 3. С. 53–58.
8. *Котликов, Е. Н.* Проектирование и изготовление интерференционных покрытий / Е. Н. Котликов, Ю. А. Новикова, А. Н. Тропин. СПб.: ГУАП, 2016. 287 с.
9. *Случинская, И. А.* Основы материаловедения и технологии полупроводников. М.: Мир, 2002. 376 с.

УДК 535.015

Е. Н. Котликов*
доктор физико-математических наук, профессор
Н. Н. Литвинова*
кандидат физико-математических наук, доцент
Ю. А. Новикова*
кандидат физико-математических наук, доцент
Е. В. Юрковец*
аспирант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СИНТЕЗ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СВЕТОДЕЛИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ*

В статье рассмотрен синтез широкополосных светоделителей в спектральном интервале 1,5–20 мкм, базирующийся на использовании разработанных методов синтеза и анализа устойчивости.

***Ключевые слова**: синтез, анализ, оптические константы, покрытия, оптимизация, устойчивость.*

**Работа выполнена при финансировании в рамках государственного задания 3.8420.2017/БЧ.*

E. N. Kotlikov *
PhD. Phys.-Math., Professor
N. N. Litvinova *
PhD. Phys.-Math., Associate Professor
Yu. A. Novikova *
PhD. Phys.-Math., Associate Professor
E. V. Yurkovez *
PhD. Student
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE SYNTESIS OF THE WIDEBAND BEAM-SPLITTING COATINGS*

The article describes the synthesis of wideband beam splitters in the spectral range of 1,5–25 microns, based on the use of the developed methods of synthesis and stability analysis.

Keywords: *synthesis, analysis, optical constants, wideband coatings, optimization, stability.*

**The work was carried out with funding under the government assignment 3.8420.2017/БЧ.*

Светоделительными покрытиями (СП) называют оптические структуры, позволяющие разделить световой поток примерно пополам без изменения спектрального состава в заданной полосе частот. Они используются как в оптическом приборостроении, в частности для нужд фурье-спектроскопии, так и в других областях науки и техники. Техническая реализация СП зависит от ширины области спектра, в которой делится излучение, от угла падения излучения на поверхность СП, от заданного соотношения интенсивностей прошедшего и отраженного лучей.

В настоящей работе рассматривается задача синтеза и выбора материалов СП для фурье-спектрометров, для которых необходимо осуществить разделение светового потока на два с соотношением интенсивностей, стремящимся к величине 50/50%. Для оценки качества светоделителей, работающих в фурье-спектрометрах, обычно используют критерий [1]

$$D(\lambda) = 4R(\lambda)T(\lambda) < 1, \qquad (1)$$

где $R(\lambda)$ – коэффициент отражения, $T(\lambda)$ – коэффициент пропускания на длине волны λ.

Этот критерий определяет контрастность интерференционной картины (глубину модуляции). Достаточными для работы являются значения $D(\lambda) > 0{,}7$. Это означает, что при примерном равенстве R и T допустимыми являются потери в покрытиях до 10–15%, а отношение T/R при отсутствии поглощения может меняться в широких пределах от 0,25 до 3,0. Для светоделительных покрытий на основе металлических пленок $D(\lambda) < 0{,}3$, поэтому такие светоделительные покрытия, как правило, не используются в фурье-спектрофотометре.

В настоящей работе рассматривается возможность синтезировать ахроматические светоделительные покрытия в диапазоне спектра 1,5–25 мкм на основании критерия (1). В указанном спектральном диапазоне имеются трудности при выборе пленкообразующего материала. Хорошо зарекомендовавшие себя пленки фторидов мало прозрачны для длин волн более 15 мкм [2, 3]. Приемлемыми являются пленки германия (Ge) и сульфида цинка (ZnS) [3, 4]. Однако в литературе практически отсутствуют данные по оптическим константам пленок ZnS в указанном диапазоне. Поэтому первой задачей было нахождение оптических констант (ОК) пленки ZnS (показателей преломления n и коэффициентов поглощения k), пригодных для синтеза оптических структур в указанном диапазоне спектра [5].

Исследования показали, что наличие поглощения в пленке несущественно меняет значение функции коррекции. При общем поглощении в пленке 10%-ная ошибка в пропускании спектра при коррекции не превысит 0,5%.

Полученные результаты для показателей преломления и поглощения показывают возможность применения пленок сульфида цинка в диапазоне 1–25 мкм.

Для синтеза покрытий использовано программное обеспечение *Film Manager* [6]. Разработанное программное обеспечение предназначено как для расчета спектров отражения, пропускания и поглощения одно- и многослойных интерференционных покрытий, так и для синтеза покрытия с целью получения заданного спектра отражения или пропускания.

В интерфейсе программы предусмотрено поэтапное (или выборочное) выполнение двух поисковых алгоритмов: случайного перебора с переменным шагом поиска, квадратичной аппроксимации Пауэлла. Также реализована загрузка информации из баз данных, заданных в *Excel*, которые содержат значения показателей преломления, коэффициентов поглощения и оцифрованные спектры пропускания или отражения в анализируемом диапазоне длин волн. Также можно задавать спектры в цифровом виде для синтеза интерференционных покрытий и пленок. Для спектров непоглощающих пленок реализован поиск показателей преломления и толщин пленки по спектру отражения или пропускания в заданном диапазоне длин волн.

На первых стадиях проектирования и изготовления интерференционных покрытий встает вопрос о влиянии случайных и систематических ошибок в толщинах пленок на конечные спектры изготовленного покрытия. При измерении толщины осаждаемого слоя в процессе напыления всегда присутствуют ошибки, обусловленные инструментальной погрешностью используемой аппаратуры, несовершенством методики измерения или просто человеческим фактором. Отсюда и возникает необходимость в оценке найденных решений с точки зрения их устойчивости по отношению к различным ошибкам, неизбежным в процессе реализации [7, 8].

Задача синтеза сводится к решению задачи по минимизации функции качества в заданной области D^{2m} – мерного пространства E^m, где m – число слоев интерференционного покрытия [5].

В программе функция качества имела следующий вид:

$$F = \sum_{i=1}^{N} \left| R_{\text{расч}}(\lambda_i) - R_{\text{эталон}}(\lambda_i) \right| W(\lambda_i),$$

где $R_{\text{расч}}(\lambda_i)$ и $R_{\text{эталон}}(\lambda_i)$ – расчетное и эталонное (требуемое) значения коэффициента отражения на длине волны

$$\lambda_i = \lambda_{\min} + (i-1)\Delta\lambda ,$$

где $\lambda_{\min}$ – коротковолновая граница спектрального интервала; $\Delta\lambda$ – величина шага поиска; N – число точек, в которых вычисляется спектр, и $W(\lambda_i)$ – весовой множитель в точке i, задаваемый пользователем.

В качестве критерия устойчивости ΔP_k можно использовать следующую величину [7]:

$$\Delta P_k = \frac{\lambda_N - \lambda_1}{N} \left(\sum_{\lambda_i} \left| \frac{T(\lambda_i, D_k) - T(\lambda_i, D_k + \Delta D_k)}{\Delta D_k} \right| \right) \times$$

$$\times \left| \Delta D_k \right| = \frac{\lambda_N - \lambda_1}{N} \left(\sum_{\lambda_i} \left| T(\lambda_i, D_k) - T(\lambda_i, D_k + \Delta D_k) \right| \right) .$$

Она характеризует трансформацию спектра при произвольных значениях ΔD_k (толщины слоя). Введенный нами критерий может быть использован и для анализа устойчивости синте-

Таблица

Конструкция СП на основе пленок ZnS и Ge

Вариант	№ слоя	Структура		Функция качества	Критерий устойчивости
		материал	$d, \lambda/4$	F	ΔP_k
1	1	ZnS	2,614	8,157	2043,24
	2	Ge	0,654		
	3	ZnS	1,135		
	4	Ge	2,135		
	5	ZnS	0,836		
2	1	ZnS	1,038	12,034	2521,17
	2	Ge	1,045		
	3	ZnS	3,086		
	4	Ge	4,722		
	5	ZnS	1,437		
	6	ZnS	0,761		

зированной структуры, и для коррекции спектральных характеристик в процессе изготовления покрытия.

При правильном выборе параметров системы СП должны обладать высокой прозрачностью в области пропускания. Исследования показали, что с увеличением числа слоев в покрытии получаются более ахроматические светоделительные покрытия. Однако их реализация становится сложной и возможность их изготовления проблематична.

Синтезировались ахроматические светоделительные покрытия на основе пленок Ge и ZnS на подложке из KBr, который прозрачен в широком диапазоне спектра от 0,2 до 40 мкм. Роль обрамляющей среды играл воздух с $n_0=1$. Отсчет слоев покрытия ведется от подложки. При этом проводилась оптимизация структур с помощью программы *Film Manager*.

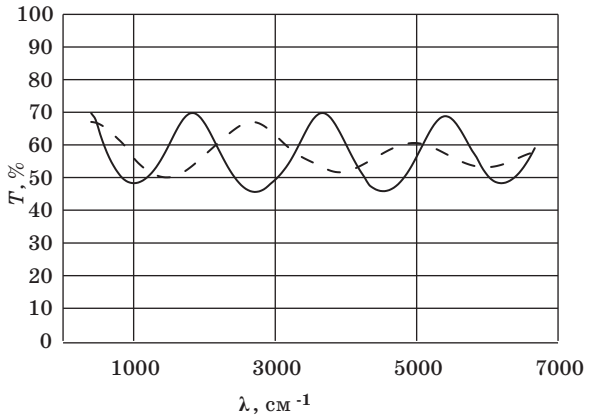


Рис. 1. Спектры пропускания синтезированных покрытий

По окончании процесса синтеза СП осуществлялся анализ устойчивости [7] найденного решения, для того чтобы смоделировать воздействие на характеристики реального покрытия различных дестабилизирующих факторов, которые возникают при изготовлении слоев покрытия (из-за нестабильности процесса изготовления пленок и контроля их параметров). Для этого менялись толщины слоев. Нечувствительность спектра к вариациям толщин свидетельствует об устойчивости решения.

Известно, что задача синтеза неоднозначна, поэтому можно получить ряд покрытий, каждое из которых нуждается в проверке на устойчивость. Для этого была составлена программа *Stability Analysis* [8], которая служит для вычисления гистограмм и расчета критерия устойчивости, позволяющего корректировать спектральные характеристики в процессе изготовления покрытия [9].

Функция качества (в программе *Film Manager*) и критерий устойчивости (*Stability Analysis*) характеризуют отклонение найденного решения от заданных спектральных характеристик. Чем функция качества меньше, тем спектральные характеристики найденного решения ближе к требуемым. Чем меньше критерий устойчивости, тем менее чувствительна структура покрытия к ошибкам в толщинах слоев.

В таблице представлены структуры полученных покрытий, функций качества и критерии устойчивости (для двух вариантов покрытий).

На рис. 1 приведены спектры синтезированных покрытий на основе ZnS и Ge, где кривая *1* соответствует варианту *1* из таблицы, а кривая *2* – варианту *2*.

Видно, что такие спектры удовлетворяют всем заданным требованиям. Область деления лежит в диапазоне от 400 до 6 700 см$^{-1}$. Во всем диапазоне спектра критерий качества СП $D(\lambda) > 0{,}8$.

На рис. 2 приведены гистограммы устойчивости по слоям для обоих синтезированных покры-

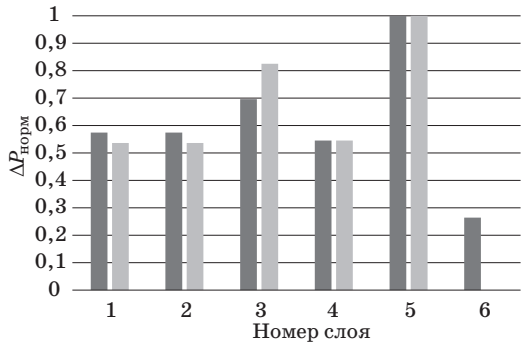


Рис. 2. Гистограммы устойчивости синтезированных покрытий

тий на основе пленок ZnS и Ge (кривые *1* и *2* соответственно). Они показывают, какие из слоев наиболее чувствительны к ошибкам в толщине.

Таким образом, в настоящей статье решена задача синтеза светоделителей в заданном спектральном интервале. Предложен метод определения оптических констант и спектров отражения, пропускания и поглощения, которые необходимы для разработки оптических светоделительных структур и оптимизации их параметров. Выбраны и экспериментально исследованы материалы, а именно пленки германия (Ge) и сульфида цинка (ZnS), которые могут быть использованы для реализации оптических структур, предназначенных для работы в дальнем ИК-диапазоне на интервале от 1,5–25 мкм.

В указанном диапазоне длин волн синтезированы две светоделительные структуры на основе 5- и 6-слойных покрытий. Проведенный анализ устойчивости данных структур показал, что 5-слойное покрытие по сравнению с 6-слойным более устойчиво к ошибкам в слоях, имеет наименьший критерий устойчивости и функцию качества, отличается простотой изготовления. Тем не менее оба покрытия удовлетворяют заданным требованиям и могут быть рекомендованы для работы в фурье-спектрофотометрах дальнего ИК-диапазона спектра.

Библиографический список

1. *Белл, Р. Д.* Введение в фурье-спектроскопию. М.: Мир, 1975. 380 с.
2. *Котликов, Е. Н.* Исследование оптических констант пленок $Ba_xMg_{1-x}F_2$ / Е. Н. Котликов, Ю. А. Новикова // Оптика и спектроскопия. 2014. Т. 117. № 3. С. 48–52.
3. *Котликов, Е. Н.* Проектирование и особенности изготовления инфракрасных оптических покрытий с воспроизводимыми характеристиками / Е. Н. Котликов, В. А. Иванов, Ю. А. Новикова, А. Н. Тропин // Известия ГУАП. № 1. СПб.: ГУАП, 2011. С. 72–78.
4. *Яковлев, П. П.* Проектирование интерференционных покрытий / П. П. Яковлев, Б. Б. Мешков. М.: Машиностроение, 1987. 192 с.
5. *Борн, М.* Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф; пер. с англ. под ред. Г. П. Мотулевич. М.: Наука, 1970. 856 с.
6. *Котликов, Е. Н.* Программа синтеза и анализа интерференционных покрытий «Film Manager» / Е. Н. Котликов, Ю. А. Новикова, И. И. Коваленко // Информационно-управляющие системы. 2015. № 1(68). С. 15–20.
7. *Котликов, Е. Н.* Сравнительный анализ критериев устойчивости интерференционных покрытий / Е. Н. Котликов, Ю. А. Новикова // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 9. С. 61–67.
8. *Котликов, Е. Н.* Программное обеспечение для анализа устойчивости и коррекции интерференционных покрытий / Е. Н. Котликов, Ю. А. Новикова // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1(62). С. 41–46.
9. *Котликов, Е. Н.* Проектирование и изготовление интерференционных покрытий / Е. Н. Котликов, Ю. А. Новикова, А. Н. Тропин. СПб.: ГУАП, 2016. 288 с.

УДК 535.345.67

А. Н. Тропин*
кандидат физико-математических наук, доцент
В. М. Андреев*
кандидат физико-математических наук, старший преподаватель
И. И. Коваленко*
кандидат физико-математических наук, доцент
Н. Н. Литвинова*
кандидат физико-математических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ВЛИЯНИЕ УГЛА ПАДЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ*

Представлены результаты исследования угловых характеристик узкополосных инфракрасных интерференционных фильтров. Установлено, что для фильтров типа Фабри – Перо порядок фильтра не влияет на их угловые характеристики. Использование высокопреломляющих материалов в разделительных (резонансных) слоях снижает зависимость положения длины волны максимального пропускания от угла падения излучения по сравнению с низкопреломляющими материалами.

***Ключевые слова**: интерференционные фильтры.*

**Работа выполнена при финансировании в рамках государственного задания 3.8420.2017/БЧ.*

A. N. Tropin*
PhD. Phys.-Math., Associate Professor
V. M. Andreev*
PhD. Phys.-Math., Senior Lecturer
I. I. Kovalenko*
PhD. Phys.-Math., Associate Professor
N. N. Litvinova*
PhD. Phys.-Math., Associate Professor
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

INFLUENCE OF THE ANGLE OF INCIDENCE ON THE CHARACTERISTICS OF OPTICAL INTERFERENCE FILTERS*

The results of the study of the angular characteristics of narrow-band infrared interference filters are presented. It is established that for filters of Fabry-Perot type the filter order does not affect their angular characteristics. The use of high-refractive materials in the separation (resonance) layers reduces the dependence of the position of the maximum transmission wavelength on the angle of incidence of radiation in comparison with low-refractive materials.

***Keywords:** interference filters.*

**The work was carried out with funding under the government assignment 3.8420.2017/БЧ.*

Полосовые и узкополосные оптические фильтры находят широкое применение в различных областях науки и техники: астрономические исследования, флуоресцентный анализ, лазерная оптика, системы мониторинга окружающей среды на основе NDIR-сенсоров, комплексные системы безопасности с применением оптических датчиков и многие другие приложения, где требуется фильтрация излучения за счет применения оптических фильтров [1–5]. В силу возмож-

ной вариативности своих спектральных характеристик оптические фильтры на основе многослойных тонкопленочных интерференционных покрытий находят наиболее широкое применение по сравнению, например, с фильтрами из цветного оптического стекла или абсорбционными светофильтрами.

Известно, что спектральные энергетические характеристики (пропускание и отражение) интерференционных фильтров зависят от угла падения излучения [6]. Более того, при наклонном падении излучения для ортогональных поляризационных компонент (s- и p-поляризации) характеристики пропускания (отражения) фильтра оказываются различными. Однако в большинстве приложений, где применяются полосовые и узкополосные интерференционные фильтры, используется неполяризованное излучение. По этой причине эффекты, связанные с поляризацией излучения, в работе затрагиваются несущественно, хотя и заслуживают отдельного подробного рассмотрения.

Целью настоящей работы являлось изучение угловых зависимостей спектральных энергетических характеристик узкополосных интерференционных фильтров на основе тонкопленочных структур из пленкообразующих материалов Ge-SiO и PbTe-$ZnSe_{0.5}S_{0.5}$.

При детальном рассмотрении условий распространения излучения в многослойной среде при наклонном падении (рис. 1) интуитивно представляется, что спектральные характеристики пропускания (отражения) должны смещаться в длинноволновую часть спектра из-за увеличения длины оптического пути. Однако это не так. Оказывается, что при наклонном падении излучения спектральные характеристики слоистых сред смещаются в область коротких длин волн.

Математический формализм, базирующийся на понятии характеристической матрицы слоистой среды, оперирует выражениями, приведенными далее.

Характеристическая матрица однослойного покрытия имеет вид

$$M_f = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \frac{i}{q_f}\sin\varphi \\ iq_f \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где φ – фазовая толщина

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\tilde{N}_f \cos\gamma_f d_f, \quad (2)$$

а γ_f – угол, под которым распространяется излучение в пленке.

Рис. 1. Распространение излучения при наклонном падении

Амплитудные коэффициенты пропускания и отражения выражаются через элементы характеристической матрицы следующим образом:

$$t = \frac{2q_{air}}{(q_{air}m_{11} + q_{Sub}m_{22}) + (q_{air}n_{Sub}m_{12} + m_{21})}, \quad (3.1)$$

$$r = \frac{(q_{air}m_{11} - q_{Sub}m_{22}) + (q_{air}n_{Sub}m_{12} - m_{21})}{(q_{air}m_{11} + q_{Sub}m_{22}) + (q_{air}n_{Sub}m_{12} + m_{21})}. \quad (3.2)$$

В случае поглощения в пленке или подложке значения амплитудных коэффициентов являются комплексными величинами, поэтому для расчета энергетических коэффициентов значения t и r берут по модулю:

$$T = \frac{q_{Sub}}{q_{air}}|t|^2, \quad (4.1)$$

$$R = |r|^2. \quad (4.2)$$

Величина q_i в выражениях (1–4) называется *эффективным показателем преломления среды* и зависит от поляризации излучения и угла γ_i распространения излучения в среде (см. рис. 1). Значения эффективных показателей преломления для воздуха q_{air}, пленки q_f и подложки q_{Sub} приведены в таблице.

Среди узкополосных оптических фильтров наибольшее распространение получили фильтры, построенные по схеме резонатора Фабри – Перо. В интерференционных фильтрах Фабри – Перо первого порядка разделительный (резонансный) слой толщиной $\lambda_0/2$ располагается между двумя диэлектрическими зеркалами, образованными слоями четвертьволновой толщины $\lambda_0/4$, где λ_0 – длина волны, соответствующая максимуму пропускания фильтра. В структу-

Таблица

Значения эффективных показателей преломления

	q_{air} (воздух)	q_f (пленка)	q_{Sub} (подложка)	Фазовая толщина пленки
S-поляризация	$n_{air}\cos\gamma_{air}$	$\tilde{N}_f\cos\gamma_f$	$\tilde{N}_{Sub}\cos\gamma_{Sub}$	$\varphi=\frac{2\pi}{\lambda}\tilde{N}_f\cos\gamma_f d_f$
P-поляризация	$\frac{n_{air}}{\cos\gamma_{air}}$	$\frac{\tilde{N}_f}{\cos\gamma_f}$	$\frac{\tilde{N}_{Sub}}{\cos\gamma_{Sub}}$	

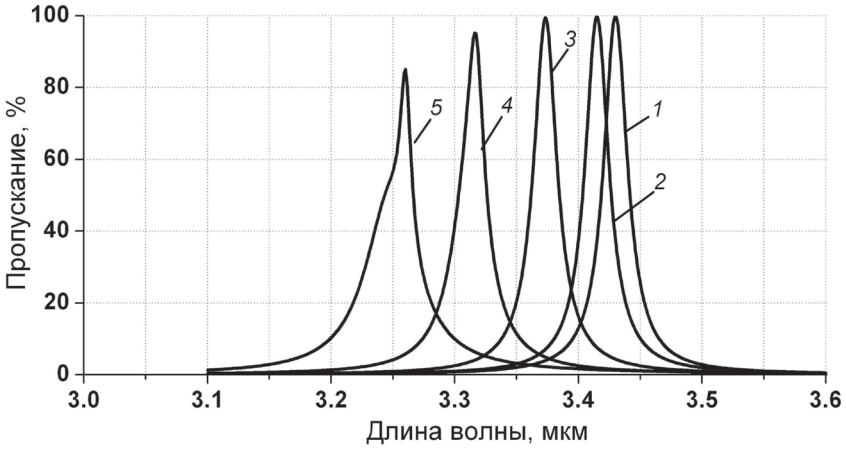


Рис. 2. Спектры пропускания структуры Si – *LHLHL2HLHLH – воздух при различных углах падения излучения: 1 – α=0°, 2 – α=15°, 3 – α=30°, 4 – α=45°, 5 – α=60°*

рах фильтров второго порядка содержатся два разделительных слоя $\lambda_0/2$.

На первом этапе в работе исследовались угловые характеристики узкополосных фильтров первого порядка с разделительным слоем как из высокопреломляющего материала, так и из материала с низким показателем преломления.

На рис. 2 и 3 представлены спектральные характеристики узкополосных фильтров с максимумом пропускания λ_{max}=3,43 мкм. Оптиче-

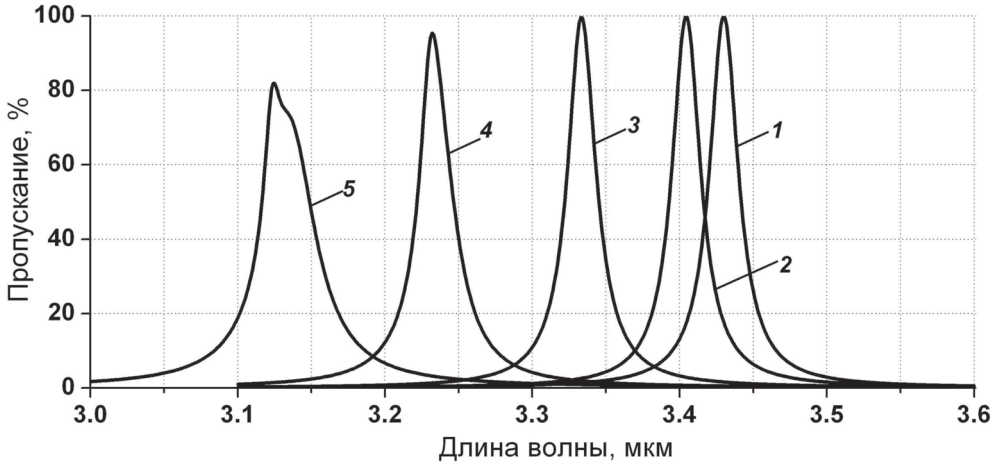


Рис. 3. Спектры пропускания структуры Si – *HLHLH2LHLHLH – воздух при различных углах падения излучения: 1 – α=0°, 2 – α=15°, 3 – α=30°, 4 – α=45°, 5 – α=60°*

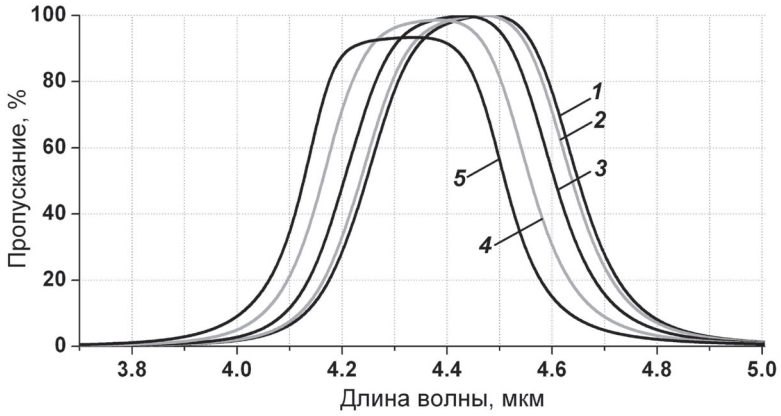


Рис. 4. Спектры пропускания неравнотолщинной структуры на основе PbTe-$ZnSe_{0.5}S_{0.5}$ *при различных углах падения излучения:*
1 – α=0°, 2 – α=15°, 3 – α=30°, 4 – α=45°, 5 – α=60°

ские фильтры с подобными характеристиками используются в датчиках абсорбционных инфракрасных газоанализаторов (*NDIR* sensors). Структуры фильтров приведены в подписях к рисункам. В качестве высокопреломляющего материала H использовался Ge, в качестве низко преломляющего L – SiO, подложка – кремний.

На следующем этапе в работе исследовались угловые зависимости для узкополосных фильтров типа Фабри – Перо второго порядка со структурами:

1) Si – HL2HLHLHL2HLH – воздух;

2) Si – HLH2LHLHLH2LH – воздух.

Также в работе проводились исследования угловых характеристик узкополосного фильтра, спроектированного с применением материалов PbTe и $ZnSe_{0.5}S_{0.5}$. Отличительной особенностью этого фильтра являлось то обстоятельство, что его структура была неравнотолщинной, т. е. в структуре содержались слои толщиной не кратной $\lambda_0/4$. Фильтр содержал 11 слоев. Его структура:

Si – 1.94L2HLHL2HLH1.96L1.83H0.44L.

Длина волны максимального пропускания такого фильтра (λ_{max}=4,45 мкм) соответствует максимуму в спектре излучения при горении углеводородов. Подобные оптические фильтры используются в датчиках противопожарной безопасности. Спектральные характеристики пропускания фильтра при различных углах падения излучения приведены на рис. 4.

На рис. 5 для рассмотренных равнотолщинных структур первого и второго порядков, а также для неравнотолщинной структуры представ-

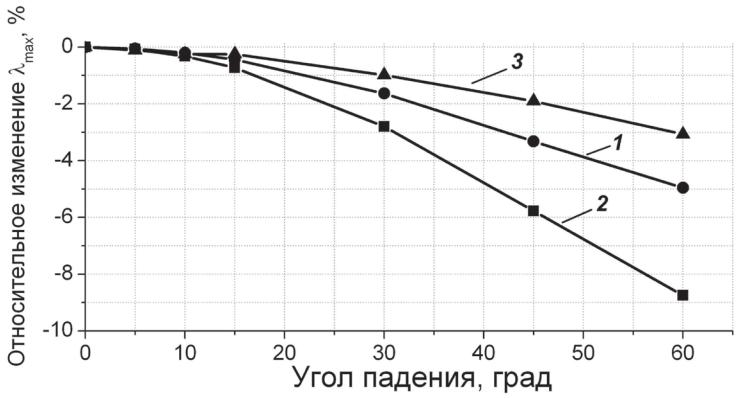


Рис. 5. Относительное изменение λ_{max} *при различных углах падения излучения:*
1 – равнотолщинные структуры с разделительным слоем 2H,
2 – равнотолщинные структуры с разделительным слоем 2L,
3 – неравнотолщинная структура с пленками PbTe и $ZnSe_{0.5}S_{0.5}$

лено относительное изменение положения λ_{max} при различных углах падения излучения.

Исследование относительного изменения λ_{max} в зависимости от угла падения излучения для исследованных равнотолщинных структур показало, что у фильтров как первого, так и второго порядков угловые характеристики зависят только от материала разделительного слоя и не зависят от количества разделительных слоев.

Также из результатов исследований следует, что, например, для угла падения 45° относительный сдвиг λ_{max} для структур с разделительным слоем 2H примерно в два раза меньше, чем для структур с разделительным слоем 2L.

В работе проведено исследование влияния угла падения излучения на спектральные характеристики узкополосных интерференционных фильтров с различными структурами. Установлено, что:

– фильтры первого и второго порядков с толщиной слоев кратной $\lambda_0/4$ имеют схожие угловые зависимости;

– структуры с разделительными слоями из высокопреломляющих материалов имеют менее выраженную угловую зависимость по сравнению со структурами с разделительными слоями из низкопреломляющих материалов;

– неравнотолщинная структура из пленок PbTe и $ZnSe_{0.5}S_{0.5}$ обладает наименьшей угловой зависимостью из исследованных структур.

Библиографический список

1. *Котликов, Е. Н.* Проектирование и изготовление интерференционных покрытий: монография / Е. Н. Котликов, Ю. А. Новикова, А. Н. Тропин. СПб.: ГУАП, 2016. 288 с.
2. *Willey, R. R.* Practical Design and Production of Optical Thin Films. New York: CRC Press, 2002.
3. *Гайнутдинов, И. С.* Интерференционные покрытия для оптического приборостроения / И. С. Гайнутдинов, Е. А. Несмелов, И. Б. Хайбуллин. Казань: ФЭН, 2002. 592 с.
4. *Тропин, А. Н.* Двухдиапазонный интерференционный фильтр для инфракрасных пожарных извещателей пламени / А. Н. Тропин, Н. Э. Тропина // Сб. тезисов докладов. I научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов АО «НИИ «Гириконд» 14–17 апреля 2014 г. СПб.: ОАО «НИИ «Гириконд». 2014. С. 3–4.
5. *Тропин, А. Н.* Многослойные оптические покрытия и интерференционные фильтры для среднего ИК-диапазона спектра / В. А. Иванов, А. Н. Тропин, В. Б. Шалин // Сб. трудов XXII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М., 2012. С. 145–147.
6. *Pollack, S. A.* Angular Dependence of Transmission Characteristics of Interference Filters and Application to a Tunable Fluorometer // Applied Optics. Vol. 5. N. 11. 1966. P. 1749–1756.

УДК 535.32

В. М. Андреев*
кандидат физико-математических наук, старший преподаватель
Е. Н. Котликов*
доктор физико-математических наук, профессор
Ю. А. Новикова*
кандидат физико-математических наук, доцент
Е. В. Юрковец*
аспирант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ПЛЕНОК ZNS В ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА 1,5–25 МКМ*

Проведены исследования оптических констант пленок ZnS в среднем и дальнем ИК-диапазоне спектра. В качестве подложек использовались пластины из кремния, достаточно прозрачные в указанном диапазоне. Кремний имеет полосы поглощения в диапазоне 8–16 мкм, что затрудняет обработку спектров. Поэтому для определения оптических констант пленок ZnS использовалась оригинальная методика, заключающаяся в коррекции спектров пропускания и отражения пленки на подложке.

***Ключевые слова**: коррекция спектров, оптические константы, спектрофотометрический метод.*

**Работа выполнена при финансировании в рамках государственного задания 3.8420.2017/БЧ.*

V. M. Andreev*
PhD. Phys.-Math., Senior Lecturer
E. N. Kotlikov*
PhD. Phys.-Math., Professor
Yu. A. Novikova*
PhD. Phys.-Math., Associate Professor
E. V. Iurkovetc*
PhD. Student
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

DETERMINATION OF OPTICAL CONSTANTS OF ZNS FILMS IN THE RANGE OF 1.5–25MM*

The optical constants of ZnS films in the middle and far infrared regions of the spectrum are studied. As substrates, silicon plates were used, which were sufficiently transparent in the indicated range. Silicon has absorption bands in the range of 8–16 μm, which makes it difficult to process the spectra. Therefore, to determine the optical constants of the ZnS films, an original technique was used, consisting in correcting the transmission and reflection spectra of the film on the substrate.

***Keywords:** correction of the spectra, optical constants, spectrophotometric method.*

**The work was carried out with funding under the government assignment 3.8420.2017/ БЧ.*

В среднем и дальнем ИК-диапазонах спектра (1–30 мкм) имеются трудности при выборе пленкообразующего материала при проектировании интерференционных покрытий [1, 2]. Хорошо зарекомендовавшие себя пленки фторидов мало прозрачны для длин волн более 12 мкм [1–3]. Приемлемыми являются пленки германия (Ge) и сульфида цинка (ZnS) [1, 2–5].

Однако в литературе практически отсутствуют данные по оптическим константам пленок ZnS в указанном диапазоне. Одной из основных задач настоящей работы является нахождение оптических констант (ОК) пленки ZnS, пригодной для синтеза оптических структур в диапазоне спектра 1–25 мкм.

В настоящей работе описаны исследования оптических констант пленок ZnS в среднем и дальнем ИК-диапазоне спектра: показателей преломления n и коэффициентов поглощения k. На практике применяются различные методики расчета оптических характеристик пленок с использованием спектров отражения и пропускания [1, 6–8]. Полученные с их помощью параметры для одиночных тонких пленок (напыленных на подложку), лежат в основе проектирования разных пленочных структур: просветляющих и отражающих покрытий, многослойных диэлектрических светоделителей и др.

Для нахождения ОК пленок использовался спектрофотометрический метод, в котором по измеренным спектрам пропускания (T) и отражения (R) находятся показатели преломления и поглощения ($A=1-T-R$) [1, 6–7]. Обычно в диапазоне до 15 мкм в спектрофотометрических методах используют подложки из селенида цинка. Они прозрачны в диапазоне 0,5–15 мкм. Однако в диапазоне спектра выше 15 мкм они становятся непрозрачными и непригодны для проведения требуемых спектрофотометрических измерений. Наиболее приемлемым материалом подложки в требуемом диапазоне является кремний (Si). Его недостатком является наличие полос поглощения выше 8 мкм. Для того чтобы учесть эффект поглощения, потребовалось разработать методику коррекции на поглощение в пленке и в подложке.

В работе [8] описана методика нахождения ОК пленок (показателей преломления n_2 и коэффициентов поглощения k_2 [9]) на непоглощающей подложке. Для нахождения n_2 и k_2 мы использовали предложенную авторами [8] методику коррекции спектров пленок на поглощение. Свободные от поглощения спектры позволяют найти оптические константы известными методами. Например, только по спектрам пропускания, или только по спектрам отражения, или совместно по спектрам отражения и пропускания при нормальном/наклонном падении.

Далее будет описана методика нахождения ОК пленок на подложках, имеющих полосы поглощения, в том числе из кремния.

Существует зависимость показателей преломления и поглощения от марки кремния, поэтому мы исследовали подложки, на которых непосредственно напылялись пленки. Реальные значения ОК подложек могут отличаться от табличных значений, что требует уточнения ОК используемых подложек по результатам измерения спектров пропускания и отражения чистой подложки.

Корректность разработанных методик расчета и соответствующего реализованного специального программного обеспечения проверялась по результатам экспериментальных исследований. В качестве подложек использовались пластины из кремния марки HRFZ. В ходе эксперимента на подложки кремния напылялись пленки ZnS. Пленки ZnS изготавливались путем термического испарения из танталовых тиглей на подложки из кремния при температуре 80 °C. Спектры подложек как до, так и после нанесения пленок ZnS в диапазоне 1,5–25 мкм снимались на фурье-спектрофотометре ФСМ1201.

На рис. 1 приведены полученные экспериментально спектры: *1* – пропускания (T_s); *2* – отражения (R_s); *3* – поглощения (A_s) для пластины кремния марки HRFZ толщиной 0,40 мм.

На рис. 2 приведены экспериментальные спектры кремниевых пластин с нанесенными пленками ZnS: пропускания T_{sf} (кривая *2*), отражения R_{sf} (кривая *4*), поглощения A_{sf} (кривая *5*). На этом же рисунке приведено поглощение в пленке A_f (кривая *6*), которое определялось как разница поглощений в подложке с нанесенной пленкой и в подложке без пленки $A_f = A_{sf} - A_s$.

Как видно из рис. 2, в области 2700–3500 см$^{-1}$ у пленки есть пик поглощения (порядка 0,05), обусловленный водой, адсорбированной на поверхности пор пленки, и парами воды

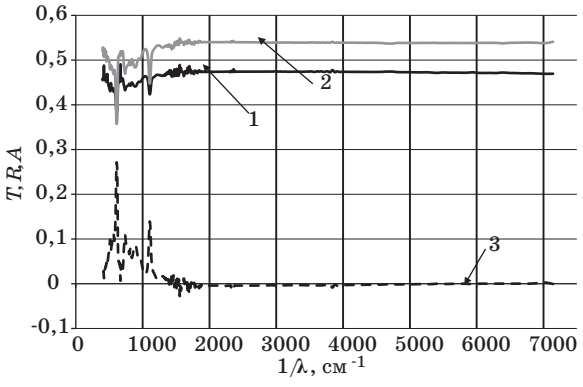


Рис. 1. Спектры отражения, пропускания и поглощения для пластины кремния: 1 – спектр пропускания (T_s); 2 – отражения (R_s); 3 – поглощения (A_s)

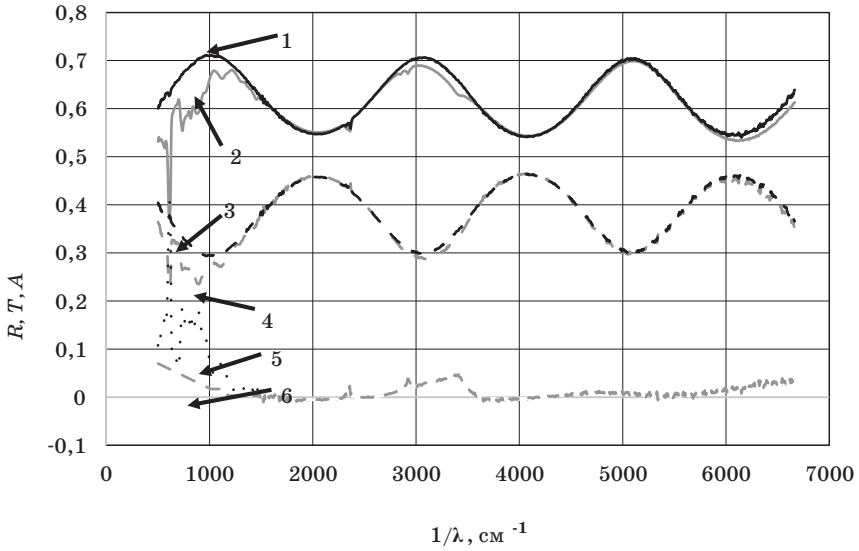


Рис. 2. Спектры отражения, пропускания и поглощения для пластины с нанесенными пленками: 1 – спектр пропускания с коррекцией; 2 – спектр пропускания; 3 – спектр отражения с коррекцией; 4 – спектр отражения; 5 – спектр поглощения

в порах. С увеличением длины волны поглощение в пленке растет, но даже при 25 мкм (400 $см^{-1}$) оно не превышает 0,06–0,08.

Спектры пленки корректировались на поглощение так, чтобы исключить из спектров поглощение в пленке и подложке и получить спектры структур, в которых отсутствует поглощение. Полученные скорректированные спектры использовались для определения показателя преломления пленки с использованием методов нахождения оптических констант непоглощающих пленок.

Коррекция спектров пленок на поглощение проводилась следующим образом. Сначала определялись толщина h_2 и значение показателя преломления пленки n_2 в области, где отсутствует поглощение в пленке и подложке – (3500–6000) $см^{-1}$. Затем для найденных значений h_2 и n_2 рассчитывались спектры с использованием следующих моделей «пленка – подложка»:

1. Непоглощающей пленки ($k_2=0$) на подложке без поглощения ($k_s = 0$). Эти спектры обозначим как T_0 и R_0.

2. Непоглощающей пленки на подложке с поглощением. Эти спектры обозначим как T_{fs} и R_{fs}.

3. Модель поглощающей пленки на подложке с поглощением (т. е. на подложке, задаваемой n_s и k_s). Эти спектры обозначим как $T_{fs}^{\text{расч}}$ и $R_{fs}^{\text{расч}}$. В качестве модели бралась пленка, спектр поглощения которой соответствовал спектру на рис. 2, т. е. имелось поглощение в области 2700–3500 $см^{-1}$ и в области 400–1500 $см^{-1}$.

Модели выбирались такими, чтобы их спектры максимально соответствовали экспериментальным.

Далее из экспериментальных R и T спектров находились откорректированные на поглощение спектры отражения $R_{fs}^{\text{кор}}$ и пропускания $T_{fs}^{\text{кор}}$ следующим образом:

$$T_{fs}^{\text{кор}} = T + f_{Tfs}A_{fs}\ ;\ \ R_{fs}^{\text{кор}} = R + f_{Rfs}A_{fs}. \qquad (1)$$

Здесь f_{Tfs} и f_{Rfs} – функции коррекции, которые определяют вклад общего поглощения A_{fs} на поглощение в пропускании $f_{Tfs}A_{fs}$ и отражении $f_{Rfs}A_{fs}$.

Функции коррекции f_{Tfs} и f_{Rfs} рассчитываются с учетом моделей поглощающей пленки как

$$f_{Tfs} = \left(T_{fs}^{\text{расч}} - T_0\right) / A_{fs};$$

$$f_{Rfs} = \left(R_{fs}^{\text{расч}} - R_0\right) / A_{fs}. \qquad (2)$$

Чтобы избежать неопределенности 0/0 в формуле (2), минимальное значение поглощения во всей области спектра для моделей 2 и 3 бралось около 0,01. Поглощение 0,01–0,02 практически не влияет на функции коррекции, что позволяет использовать их для всех реально существующих в спектре поглощений. То есть находились такие функции коррекции, которые позволяли из полученных экспериментальных измерений получить теоретическое приближение к кривым с минимизацией поглощения.

Такая процедура позволяет найти спектры отражения и пропускания, которые пригодны

для определения ОК с использованием известных методов для непоглощающих пленок. Эти же спектры позволяют получить оценку показателей преломления и коэффициентов поглощения по формулам, приведенным в [9], которые используются при синтезе покрытий.

На рис. 2 также приведены спектры пропускания (кривая *1*) и отражения (кривая *3*), скорректированные на поглощение пленки. Откорректированные спектры пропускания $T_{fs}^{\text{кор}}$ и отражения $R_{fs}^{\text{кор}}$ пленки, свободные от поглощения, использовались для нахождения оптических констант пленки сульфида цинка. На этом же рисунке (кривая *6*) приведен спектр поглощения в пленке, который получен как разность спектров поглощения в пленке и подложке и поглощения в подложке. Его значение не превышает 0,05–0,07.

Спектры пленок рассчитывались с использованием программы *Film Manager* [10]. Для нахождения оптических констант пленок использовался пошаговый метод, который заключается в том, что сначала определяется средний коэффициент преломления во всем диапазоне. Для его нахождения использовалась разработанная на базе программы *Film Manager* программа анализа пленок *Film Analisis* [11], в которой предусмотрено нахождение среднего значения показателя преломления $<n>$ на выбранном участке спектра непоглощающей пленки.

Среднее значение показателя преломления находится методом случайного перебора и методом квадратичной аппроксимации Пауэлла [12]. Рассчитанное во всем спектральном диапазоне, оно задается в качестве первого приближения. Выбирается определенная ширина полосы спектра $\Delta T_{i,i+1} = T_{i+1} - T_i$ для начальной точки $\lambda_{\min}$, в которой рассчитывается новое значение показателя преломления n_2. После этого спектр сдвигается на заданный шаг $\delta T < \Delta T_{i,i+1}$. При этом значения показателя преломления на одном участке спектра являются начальным приближением на следующем, на котором снова рассчитывается n_2.

Исследования показали, что наличие поглощения в пленке несущественно меняет значение функции коррекции. При общем поглощении в пленке 10%-ная ошибка в пропускании спектра при коррекции не превысит 0,5%.

Для синтеза покрытий использовано программное обеспечение *Film Manager* [10]. Разработанное программное обеспечение предназначено как для расчета спектров отражения, пропускания и поглощения одно- и многослойных интерференционных покрытий, так и для синтеза покрытия с целью получения заданного спектра отражения или пропускания.

В интерфейсе программы предусмотрено поэтапное (или выборочное) выполнение двух поисковых алгоритмов: случайного перебора с переменным шагом поиска, квадратичной аппроксимации Пауэлла. Также реализована загрузка информации из баз данных, заданных в *Excel*, которые содержат значения показателей преломления, коэффициентов поглощения и оцифрованные спектры пропускания или отражения в анализируемом диапазоне длин волн. Также можно задавать спектры в цифровом виде для синтеза интерференционных покрытий и пленок. Для спектров непоглощающих пленок реализован поиск показателей преломления и толщин пленки по спектру отражения или пропускания в заданном диапазоне длин волн.

На рис. 3 приведены найденные значения показателя преломления пленки ZnS в диапазоне 1,5–25 мкм.

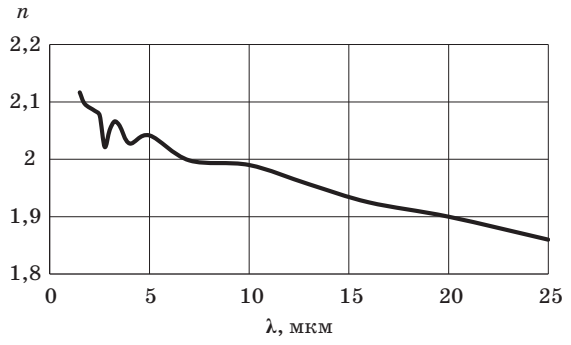


Рис. 3. Зависимость показателя преломления от длины волны

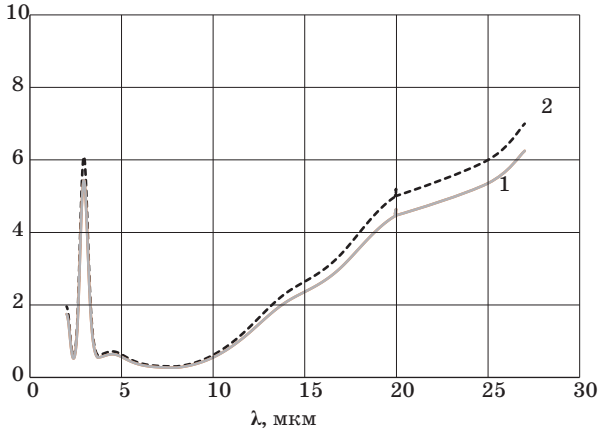


*Рис. 4. Зависимость поглощения A_f (в %, кривая 1) и коэффициента поглощения α (в $см^{-1}$ *0,01, кривая 2) пленки ZnS от длины волны*

Полученные результаты для показателей преломления и поглощения показывают возможность применения пленок сульфида цинка в диапазоне 1–25 мкм.

Поглощение в пленке A_f определялось из спектров поглощения пленки с подложкой – A_{sf} и поглощения в подложке A_s : $A_f = A_{sf} - A_s$. Численное моделирование показало, что это уравнение выполняется с точностью до 1% при общем поглощении до 15–20%.

На рис. 4 приведены значения измеренного поглощения в пленке A_{sf} в процентах (кривая *1*) и коэффициента поглощения α в $см^{-1}$ (кривая *2*).

Коэффициент поглощения α определялся из уравнения

$$\alpha = A_f / d, \qquad (3)$$

где $d = 1{,}12$ мкм – геометрическая толщина пленки, полученная из спектров R (или T) с использованием программы *Film Analisis*.

Полученные результаты показывают, что коэффициент поглощения в пленках ZnS невелик в диапазоне 1–27 мкм и сами пленки могут с успехом применяться вплоть до длин волн 25–30 мкм.

Выводы

Проведены исследования оптических констант пленок ZnS в среднем и дальнем ИК-диапазоне спектра. В качестве подложек использовались пластины из кремния, достаточно прозрачные в указанном диапазоне. Кремний имеет полосы поглощения в диапазоне 8–16 мкм, что затрудняет обработку спектров. Поэтому для определения оптических констант пленок ZnS использовалась оригинальная методика, заключающаяся в коррекции спектров пропускания и отражения пленки на подложке. Найдены дисперсионные зависимости пленок ZnS в диапазоне спектра 1,3–27 мкм.

Библиографический список

1. *Котликов, Е. Н.* Проектирование и изготовление интерференционных покрытий / Е. Н. Котликов, Ю. А. Новикова, А. Н. Тропин. СПб.: ГУАП, 2016. 287 с.
2. Оптические пленкообразующие материалы для инфракрасной области спектра / Е. Н. Котликов, Ю. Н. Кузнецов, Н. П. Лавровская, А. Н. Тропин // Научное приборостроение. 2008. Т. 18. Вып. 3. С. 32–36.
3. *Тропин, А. Н.* Пленкообразующие материалы для тонкослойных оптических покрытий: новые задачи и перспективы (обзор) // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 2. С. 206–211.
4. Исследование оптических свойств пленок германия в средней ИК области спектра / Е. Н. Котликов, В. А. Иванов, Е. Н. Прокашев, А. Н. Тропин // Оптика и спектроскопия. 2009. Т. 108. № 6. С. 1003–1006.
5. *Сеник, Б. Н.* Применение кристаллов в перспективных разработках гиперспектральных оптических систем // Прикладная физика. 2007. № 3. С. 134–141.
6. *Poelman, D.* Methods for the determination of the optical constants of thin films from single transmission measurements: a critical review / D. Poelman, P. F. Smet // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. Vol. 36. P. 1850–1857.
7. *Коновалова, О. П.* Определение оптических констант слабопоглощающих диэлектрических слоев на прозрачной подложке / О. П. Коновалова, И. И. Шаганов // Оптико-механическая промышленность. 1988. № 8. С. 39–41.
8. *Котликов, Е. Н.* Метод определения оптических констант поглощающих пленок. Подложки без поглощения / Е. Н. Котликов, Е. В. Юрковец // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 1. С. 1–6.
9. *Борн, М.* Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. М.: Наука, 1970. 856 с.
10. *Котликов, Е. Н.* Программа синтеза и анализа интерференционных покрытий «Film Manager» / Е. Н. Котликов, Ю. А. Новикова, И. И. Коваленко // Информационно-управляющие системы. 2015. № 1(68). С. 15–20.
11. *Котликов, Е. Н.* Программное обеспечение для нахождения оптических констант пленок / Е. Н. Котликов, Ю. А. Новикова, Е. В. Юрковец // Сб. докладов научной сессии ГУАП. 2016. С. 253–257.
12. *Васильев, Ф. П.* Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1980. 520 с.

УДК 65.011.8

Е. Г. Семенова*
доктор технических наук, профессор
Г. Н. Семенкова*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ РИСКОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОДУКЦИИ

В статье рассмотрена возможность применения методов оценки рисков, не включенных в ГОСТ Р ИСО 31010: проведена идентификация рисков, их ранжирование, а также кластеризация по уровню критичности; рассчитана критическая цепочка рисков, реализация которых окажет наибольшее влияние на комплексный показатель уровня критичности технологического процесса.

***Ключевые слова**: уровень критичности риска, технологический процесс, кластеризация, граф, оценка рисков.*

E. G. Semenova
PhD. Tech., Professor
G. N. Semenkova
Postgraduate Student
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

METHODS OF RISK ASSESSMENT AND INDIFICATION IN THE PRODACTION OF RADIO ELECTRONIC PRODUCTS

The article considers the possibility of applying risk assessment methods not included in ISO 31010: identification of risks, their ranking, clustering by the level of criticality, the critical chain of risks is calculated the which implementation has the greatest impact on the complex indicator of level of risk of investigated process.

***Keywords:** level of risk criticality, process, clustering, graph, risk assessment.*

К основным задачам, стоящим перед любым предприятием, относится задача обеспечения стабильного уровня качества выпускаемой продукции и технологических процессов ее изготовления.

В ходе процесса производства, а именно в ходе технологических процессов (ТП), происходит формирование большинства свойств, характеризующих качество изготавливаемой продукции. Несовершенство ТП приводит к отклонениям реальных количественных характеристик от номинальных и, соответственно, к снижению показателей качества и безопасности.

Безопасность ТП в отношении качества продукции – свойство ТП сохранять при функционировании в определенных условиях такое состояние, при котором с заданной вероятностью исключается риск ухудшения качества продукции, обусловленный воздействием неблагоприятных факторов на компоненты систем [1].

При оценивании качества ТП производится контроль и измерение параметров технологических операций и переходов, последовательность их выполнения, а также технические элементы технологической системы и факторы, оказывающие влияние на основные технологические показатели и характеристики безопасности ТП, а также качество изготавливаемой продукции [2].

Задача обеспечения качества и безопасности функционирования ТП сводится к снижению риска до минимального уровня возможности возникновения ситуаций, отрицательно влияющих на качество продукции.

Идентификация рисков ТП проводится исходя из составляющих процесс подпроцессов и определенных показателей качества (ПК) про-

цесса. Типовой перечень ПК процесса изложен в работе [2]. Пример возможного перечня рисков ТП представлен в табл. 1.

Для проведения дальнейших расчетов экспертной группе (ЭГ) необходимо провести ранжирование идентифицированных рисков и рас-

Таблица 1

Перечень рисков

№	Сфера возникновения риска	Наименование риска
1	Риски в сфере обращения	$R_{1.1}$ Риск закупки некачественного материала, ПКИ, необходимых для реализации ТП
		$R_{1.2}$ Риск несвоевременной поставки необходимых для ТП материалов и ПКИ
2	Риски в сфере управления ТП	$R_{2.1}$ Риск недостаточного контроля выявления бракованной продукции
		$R_{2.2}$ Риск отклонения ТП от КД, ТД
		$R_{2.3}$ Риск несвоевременной актуализации КД, ТД
3	Риски в сфере кадрового менеджмента	$R_{3.1}$ Риск нарушения в производстве техники безопасности по видам работ, выполняемых при реализации ТП
		$R_{3.2}$ Риск реализации ТП в производстве персоналом, не прошедшим производственное обучение и инструктаж
		$R_{3.3}$ Риск потери ключевого сотрудника в результате увольнения/переманивания конкурентами
		$R_{3.4}$ Риск осуществления работ ТП персонала несоответствующей квалификации
4	Риски, возникающие в ходе производственной деятельности ТП	$R_{4.1}$ Риск появления бракованной продукции в ходе ТП
		$R_{4.2}$ Риск производства дефектной продукции в ходе ТП
		$R_{4.3}$ Риск несдачи продукции ОТК (ВП) с первого предъявления
		$R_{4.4}$ Риск выхода из строя оборудования, задействованного в ТП
		$R_{4.5}$ Риск отказа изделия при проведении технологических тренировок
		$R_{4.6}$ Риск нарушения технологии проведения этапов ТП
		$R_{4.7}$ Риск осуществления ТП по неактуальной версии КД
5	Риски производственной инфраструктуры	$R_{5.1}$ Риск возникновения аварии в ходе ТП
		$R_{5.2}$ Риск возникновения перебоя с электроснабжением
		$R_{5.3}$ Риск несоответствия ТД возможностям производства

считать коэффициент конкордации для проверки уровня согласованности мнений экспертов по формуле:

$$W = \frac{12S}{n^2(m^3 - m)}, \quad (1)$$

где

$$S = \sum_{j=1}^{m}\left(\sum_{i=1}^{n} r_{ij} - \frac{n(m+1)}{2}\right)^2, \quad (2)$$

n – число экспертов; m – число оцениваемых параметров; r_{ij} – ранг j-го параметра, присвоенный i-м экспертом.

Результаты ранжирования представлены в табл. 2.

Таблица 2

Ранжирование идентифицированных рисков

№	Наименование риска	Экспертная группа			Σ рангов	Весовой коэф.
		Эксперт 1	...	Эксперт 15		
1	Риск 4.1	1	...	2	19,5	0,227
2	Риск 4.2	2	...	1	25,5	0,174
3	Риск 4.6	3,5	...	4	51,5	0,086
4	Риск 1.1	3,5	...	3	54,0	0,082
5	Риск 2.2	5	...	5	78,0	0,057
6	Риск 4.5	6	...	6,5	90,5	0,049
7	Риск 2.1	7,5	...	6,5	103	0,043
8	Риск 4.4	7,5	...	8	119,5	0,037
9	Риск 3.4	9	...	9	133,5	0,033
10	Риск 2.3	10	...	12	156	0,028
11	Риск 5.1	11	...	11	165	0,027
12	Риск 5.2	12	...	10	177,5	0,025
13	Риск 5.3	13	...	13	191,5	0,023
14	Риск 3.1	14,5	...	14	210,5	0,021
15	Риск 3.2	14,5	...	15,5	228,5	0,019
16	Риск 3.3	16	...	15,5	237	0,019
17	Риск 4.3	17	...	17	256	0,017
18	Риск 4.7	18	...	18	271,5	0,016
19	Риск 1.2	19	...	19	281,5	0,016
Σ		190	...	190	2850	

$$W = 127006 \Big/ \left(\frac{1}{12}15^2(19^3 - 19) - 15 \cdot 14\right) = 0{,}99. \quad (3)$$

Значение коэффициента конкордации говорит о высокой степени согласованности мнений экспертов.

Для оценки значимости коэффициента конкордации рассчитывается критерий согласования Пирсона:

$$X_2 = \frac{S}{\frac{1}{12} \cdot 15 \cdot 19 \cdot (19+1) + \frac{1}{(19-1)} \cdot 14} = 267{,}82. \quad (4)$$

Вычисленный χ^2 необходимо сравнить с табличным значением для числа степеней свободы $K = n - 1 = 19 - 1 = 18$ и при заданном уровне значимости $\alpha = 0{,}05$. Так как χ^2 расчетный 267,82 ≥ табличного (28,86930), то $W = 0{,}99$ – величина не случайная, а потому полученные результаты имеют смысл и могут использоваться в дальнейших исследованиях.

Стандарт ГОСТ Р ИСО 31010 [3] содержит 31 методику оценки рисков, но данный перечень не является полным. Далее описаны способы оценки рисков, не включенные в данный стандарт.

Кластеризация идентифицированных рисков осуществляется с целью разбиения идентифицированных рисков на классы, каждый из которых соответствует определенной рисковой группе уровня критичности (очень низкий, низкий, приемлемый, высокий, очень высокий).

Кластерный анализ позволяет провести предварительную оценку идентифицированных рисков еще до проведения количественной оценки. Кроме того, уже на первоначальных этапах оценки можно выявить риски, требующие срочной разработки мероприятий по их управлению, и риски, на которые следует обратить внимание в первую очередь при дальнейшей оценке.

При кластеризации большое значение имеет выбор метрики пространства признаков [4]. В данной работе использовалось расстояние Евклида, представляющее собой геометрическое расстояние в многомерном пространстве:

$$d(x,y) = \left\{\sum_i (x_i - y_i)^2\right\}^{1/2}. \qquad (5)$$

В результате кластерного анализа идентифицированные риски были отнесены к трем кластерам.

Наиболее важным результатом, получаемым в итоге древовидной кластеризации, является иерархическое дерево (рис. 1).

В табл. 3 определены риски, входящие в каждый из кластеров, а также отображены евклидовы расстояния объектов от центров (средних значений) соответствующих им кластеров.

Таблица 3

Элементы кластеров и расстояния до их центров

Кластер	Риск	Евклидово расстояние от центра
Кластер 1	R1	0,813399
	R2	0,062423
	R3	0,164154
	R4	0,467656
	R5	0,378220
	R6	0,886216
	R10	0,635843
	R14	0,339344
Кластер 2	R7	0,335016
	R8	0,207856
	R11	0,311449
	R12	0,416776
	R13	0,460493
	R19	0,565512
Кластер 3	R9	0,661517
	R15	0,612839
	R16	0,402020
	R17	0,321370
	R18	0,820987

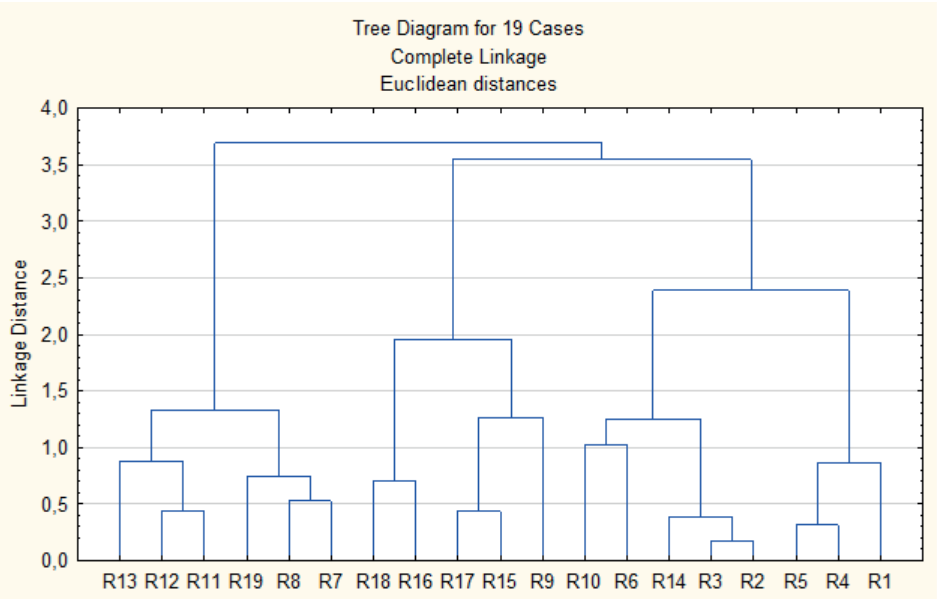


Рис. 1. Кластеризация идентифицированных рисков

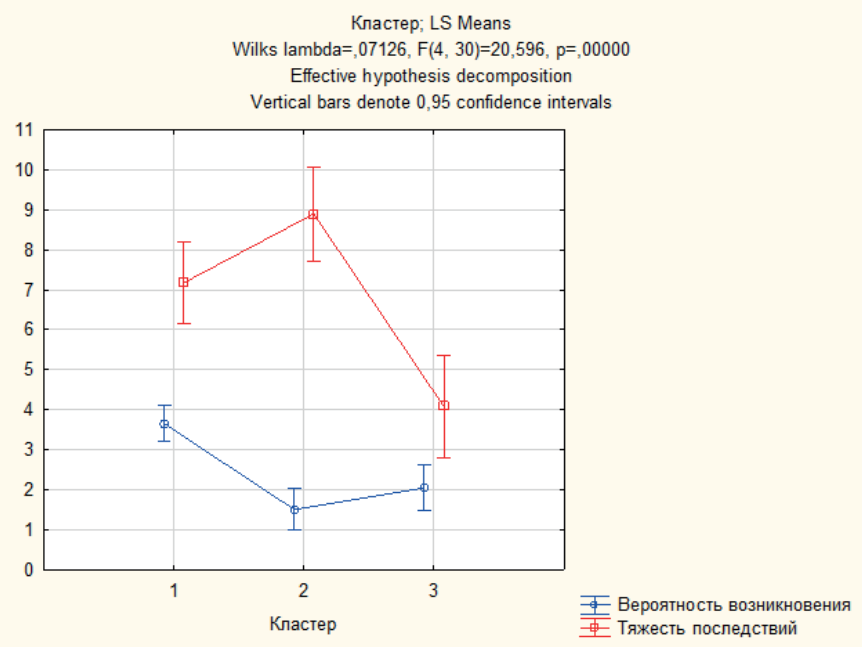


Рис. 2. График средних и доверительных интервалов для переменных в каждом кластере

Построен график средних и доверительных интервалов для переменных в каждом кластере (рис. 2).

Одновременное проявление всех рисков является маловероятным событием. При этом реализация того или иного риска может повлечь за собой возникновение другого, что в результате может привести к возникновению цепочки взаимосвязанных рисков [5]. Определить среди них ту, которая может оказать наибольшее влияние на комплексный показатель, можно с помощью ациклического ориентированного графа рисков.

Количественная оценка уровня риска, для которого не выявлено ни одного рискообразующего фактора, влияющего на его реализацию, определяется из соотношения [6]:

$$R_i = B_i T_i \qquad (6)$$

где T_i – тяжесть последствий при реализации i-го риска; B_i – вероятность возникновения i-го риска.

Для нахождения наиболее критической цепочки рисковых ситуаций произвольная цепочка представляется вектором [7]:

$$X = \left\{ T_{ij} \,|\, (ij) \in G \right\}. \qquad (7)$$

При этом $T_{ij}=1$, если дуга (i, j) принадлежит рассматриваемой цепочке, иначе $x_{ij}=0$ [5].

Возможная величина изменения критериального показателя для X-цепочки рисковых ситуаций:

$$R(X) = \sum_{(ij)\in G} R_{ij} x_{ij}, \qquad (8)$$

где $R_{ij}=B_{ij}T_{ij}$, если дуга $(i, j)\in G$, иначе $R_{ij}=0$.

На рис. 3 представлен граф, отражающий корреляцию идентифицированных рисков, и определена цепочка рисков, реализация которых окажет наибольшее влияние на комплексный показатель уровня критичности рисков (УКР).

Следует заметить, что в данную цепочку входят риски из разных кластеров, что означает, что при оценке рисков необходимо учитывать не

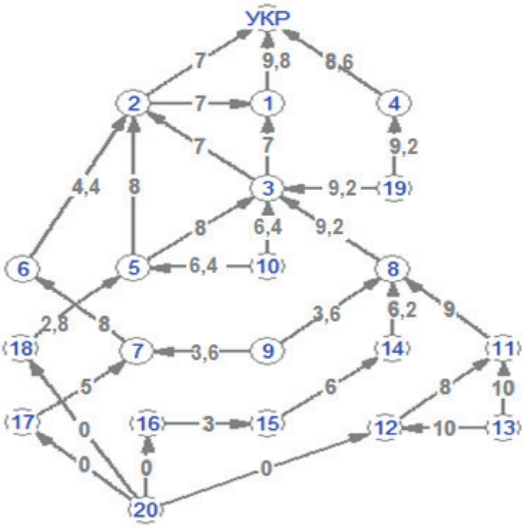


Рис. 3. Граф идентифицированных рисков

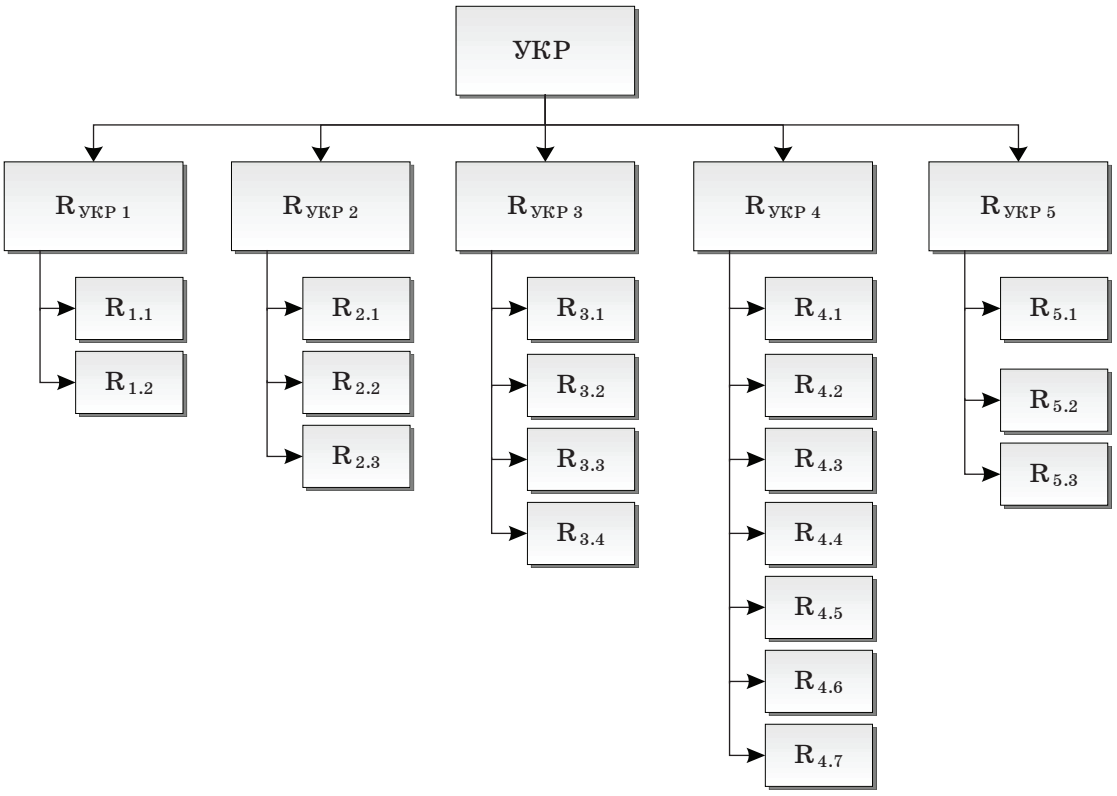


Рис. 4. Структура рисков ТП

только принадлежность рисков к определенному кластеру, но и их взаимосвязь между собой.

Найдена критическая цепочка

$$13 > 12 > 11 > 8 > 3 > 2 > 1 > \text{УКР}.$$

Критический путь равен 60. Максимальное воздействие рисков равняется 0,1826, то есть при возникновении указанных рисковых ситуаций комплексный показатель уровня рисков возрастет на 18,26%.

Так как ТП может характеризоваться не только уровнем критичности риска, то в ряде случаев существует необходимость выразить УКР одним числом. В таком случае необходим комплексный метод оценки, предполагающий использование комплексного (обобщенного) показателя УКР.

На рис. 4 изображена структура идентифицированных рисков исследуемого ТП при помощи древовидной диаграммы.

Для определения необходимости разработки мер по снижению риска были сформированы интервалы значений, характеризующие УКР как единичных показателей, так и сводных и обобщенного (табл. 4).

Уровень критичности единичных рисков рассчитывается по формуле (6). Результаты расчетов представлены в табл. 5.

Таблица 4

Интерпретация полученных значений

Интервал оценки УКР		Интерпретация
Единичные показатели	Сводные и комплексный показатели	
1–6	0,001–0,06	Очень низкий (ОН) уровень риска. Мониторинг. Не требуется принятие дополнительных мер
7–20	0,07–0,20	Низкий (Н) уровень риска. Разработка мер по управлению рисками не требуется. Осуществляется мониторинг. Возможна разработка предупреждающих действий
21–42	0,21–0,42	Средний (С) (приемлемый) уровень риска. Разработка предупреждающих действий по управлению рисками
43–72	0,43–0,72	Высокий уровень (В) данного вида риска. Требуется разработка корректирующих действий и мероприятий по управлению рисками
73–100	0,73–1,00	Очень высокий (ОВ) (критический) уровень риска. Требуется срочная разработка мер по управлению рисками

Таблица 5

Результаты расчетов УКР единичных показателей

Обозначение риска	Вероятность возникновения (В)	Тяжесть последствий (Т)	УКР единичных рисков (R_i)	Интерпретация
Риски в сфере обращения				
Риск 1.1	3,4	8,6	29,24	С
Риск 1.2	1,9	2,4	4,56	ОН
Риски в сфере управления ТП				
Риск 2.1	1,8	8	14,4	Н
Риск 2.2	3,8	8	30,4	С
Риск 2.3	4,6	6,4	29,44	С
Риски в сфере кадрового менеджмента				
Риск 3.1	3,4	6,2	21,08	С
Риск 3.2	1,8	6	10,8	Н
Риск 3.3	2,4	3	7,2	Н
Риск 3.4	1	3,6	3,6	ОН
Риски, возникающие в ходе производственной деятельности ТП				
Риск 4.1	3,6	9,8	35,28	С
Риск 4.2	3,6	7	25,2	С
Риск 4.3	1,8	5	9	Н
Риск 4.4	1,8	9,2	16,56	Н
Риск 4.5	4	4,4	17,6	Н
Риск 4.6	3,4	7	23,8	С
Риск 4.7	3,2	2,8	8,96	Н
Риски производственной инфраструктуры				
Риск 5.1	1	9	9	Н
Риск 5.2	1	8	8	Н
Риск 5.3	1	10	10	Н

Таблица 6

Результаты расчета УКР сводных показателей

№	Наименования сводного показателя риска	УКР сводного показателя риска ($R_{УКРj}$)	Интерпретация
1	Риски в сфере обращения	0,17	Н
2	Риски в сфере управления ТП	0,25	С
3	Риски в сфере кадрового менеджмента	0,11	Н
4	Риски, возникающие в ходе производственной деятельности ТП	0,19	Н
5	Риски производственной инфраструктуры	0,09	Н

Значения сводных показателей УКР рассчитываются по формуле

$$R_{УКРi} = \frac{\sum B_i T_i}{n B_{i\max} T_{i\max}}, \quad (9)$$

где n – $B_{i\max}$ – максимальное значение показателя вероятности возникновения риска, $T_{i\max}$ – максимальное значение показателя тяжести последствий.

Результаты расчетов приведены в табл. 6.

Обобщенный показатель УКР ТП рассчитывается по формуле (10) и равен УКР=0,16, что соответствует низкому уровню критичности, разработка мер по управлению не требуется.

$$УКР = \frac{\sum R_{УКРi}}{m R_{УКРi\max}}, \quad (10)$$

где m – число сводных показателей УКР, $R_{УКРi\max}$ – максимальное значение сводного показателя УКР.

Таким образом, несмотря на низкий уровень критичности комплексного показателя, часть единичных рисков принадлежит к среднему уровню и требует разработки предупреждаю-

щих действий, также в состав критической цепочки, рассчитанной с помощью теории графов, входят риски из разных кластеров, что означает, что при оценке рисков необходимо учитывать не только принадлежность рисков к определенным кластерам (уровням критичности), но и их взаимосвязь между собой.

Библиографический список

1. *Кочегин, А. А.* Показатели качества технологических процессов и систем / А. А. Кочегин // Современные техники и технологии. 2004. Т. 3. С. 137–138.
2. *Федюкин, В. К.* Управление качеством производственных процессов: учеб. пособие. 2-е изд., стер. М.: КНОРУС, 2015. 230 с.
3. ГОСТ Р ИСО 31010-2011. Менеджмент риска. Методы оценки риска. М.: Стандартинформ. 2012. 70 с.
4. *Семенова, Е. Г.* Основы моделирования и диагностики антенных устройств бортовых комплексов: монография. СПб.: Политехника, 2003. 186 с.
5. *Антохина, Ю. А* Информационная поддержка процессов улучшения качества технических объектов: монография / Ю. А. Антохина, А. Г. Варжапетян, Е. Г. Семенова. СПб.: Политехника, 2016. 305 с.
6. *Коршунов, Г. И.* Оценка рисков дополнительного профессионального образования при подготовке специалистов научно-производственных организаций / Г. И. Коршунов, Н. В. Маркелова, В. Н. Николаев // Научно-технические ведомости СПБГУ. 2013. № 183-2. С. 200–205.
7. *Антохина, Ю. А.* Метод оценки в организации производства критического набора ситуаций в процессе риск-менеджмента / Ю. А. Антохина, А. Г. Варжапетян, П. В. Глущенко // Управление экономическими системами. 2013. № 10 (58). С. 11.

УДК 621.9.004.12

Е. Г. Семенова*
доктор технических наук, профессор
Я. А. Ивакин*
доктор технических наук, профессор
Е. А. Фролова*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА ИНТЕРАКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РУКОВОДСТВ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕМОНТУ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

В работе рассматриваются аспекты концепции менеджмента качества интерактивных электронных технических руководств (ИЭТР) по эксплуатации и ремонту авиационной техники. Базовым конструктивом предлагаемой концепции менеджмента качества выступает двухуровневое представление качества рассматриваемых ИЭТР.

***Ключевые слова**: интерактивное электронное техническое руководство, эксплуатация и ремонт авиационной техники, менеджмент качества.*

E. G. Semenova*
PhD. Tech., Professor
Ya. A. Ivakin*
PhD. Tech., Professor
E. A. Frolova*
PhD. Tech., Associate Professor
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

QUALITY MANAGEMENT OF INTERACTIVE ELECTRONIC TECHNICAL MANUALS FOR OPERATION AND REPAIR OF AVIATION EQUIPMENT

The paper discusses aspects of the quality management concept of interactive electronic technical manuals (IETM) for the operation and repair of aviation equipment. The basic construct of the proposed concept of quality management is a two-level presentation of the quality of the IETRs under consideration.

***Keywords:** interactive electronic technical manual, operation and repair of aviation equipment, quality management.*

Менеджмент качества интерактивных электронных технических руководств (ИЭТР) по эксплуатации и ремонту авиационной техники рассматривается как последовательный процесс итеративных процедур оценивания и улучшения качества информационно-программных средств логистической поддержки.

Традиционно качество ИЭТР принято оценивать и улучшать именно как качество программных или информационных продуктов, то есть с опорой на традиционные методологические школы и метрики квалиметрии программного обеспечения. Однако гамма потребностей, которые призваны удовлетворять ИЭТР, в частности ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники, имеет ряд принципиальных и значимых отличий от потребностей основной массы традиционных программных комплексов. К особенностям ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники можно отнести:

– определяющее значение полноты, актуальности и точности содержательного контента о предмете эксплуатации авиационной техники, поддерживаемых мероприятиях ее технического обслуживания и ремонта;

– высокогетерогенный характер обрабатываемых данных: от потоковых данных аудио-, ви-

деоформатов до статичных массивов расчетных параметров;

– необходимость глубокой виртуализации, определяемая потребностью отображать результаты функционирования на удаленных и мобильных АРМ, а также предоставления сервисов виртуальной, дополненной реальности для средств перспективной периферии систем логистической поддержки.

Именно эти особенности были положены в основу при разработке конструктива предлагаемой концепции менеджмента (управления) качества ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники – двухуровневого рассмотрения (представления) качества ИЭТР. Учитывая теснейшую связь возможностей программно-технологической платформы создания ИЭТР и контент-репрезентационных возможностей по логистической поддержке эксплуатантов, представляется рациональным рассматривать качество указанных программно-информационных продуктов на двух уровнях представления, как это показано в табл. 1.

Таблица 1

Уровни представления качества ИЭТР для эксплуатации и ремонта авиационной техники

Уровень	Рассматриваемый аспект качества
Предметно-логический	Степень удовлетворения потребностей в логистической поддержке процедур эксплуатации авиатехники, прежде всего качество содержательного контента и его соответствие передовым практикам предметной области
Информационно-технологический	Степень удовлетворения потребностей в программном функционале для эффективной работы с гетерогенными данными, общая и прикладная полезность ИЭТР как программного средства генерализации и визуализации данных

Традиционный подход к рассмотрению качества ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники как исключительно качества программного обеспечения значительно искажает и обедняет гамму показателей его оценки. Это, в свою очередь, приводит к недостаточной адекватности процедур управления качеством ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники.

При этом сегодня уже очевидно, что определяющим в удовлетворении потребностей эксплуатантов авиационной техники в таких средствах логистической поддержки, как ИЭТР, является не только и не столько программно-технический аспект качества, сколько предметно-содержательный его аспект. Иными словами, качество ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники в целом прежде всего определяет качество его содержательного контента, но при этом качество программной среды реализации должно быть заданного уровня.

По существу, вводимое двухуровневое представление качества ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники на практике предопределяет следующее:

– в современных условиях ИЭТР предоставляет структурированный объем данных по тематике возникшего запроса практики (по обнаруженному отказу авиатехники, по регламенту проводимых работ и пр.), а эксплуатант, опираясь на модель предметной области в своем сознании, должен оперативно найти и вычленить необходимые данные, подобрав нужную форму вербализации или отображения;

– в предлагаемом подходе в ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники еще на этапе создания, подэтапе разработки электронного контента реализуется модель предметной области (как совокупность моделей реализуемых видов технического обслуживания, диагностических моделей и пр.), отвечающая опыту и лучшим практикам ведущих специалистов в данной отрасли авиапрома. Тогда программная среда, обрабатывая входную информацию от эксплуатанта-пользователя и опираясь на реализованную логическую модель предметной области, адаптивно сузит информационное пространство поиска и определения формы представления необходимых данных для эксплуатанта-пользователя. При этом на информационно-технологическом уровне рассмотрения реализация вышеописанной схемы не ведет к принципиальному усложнению процесса взаимодействия эксплуатанта-пользователя с ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники. Существо этого подхода наглядно показано на рис. 1.

Требования адаптивности и соответствия передовым практикам к контенту ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники на информационно-технологическом уровне рассмотрения заключаются не только в простом вложенном декомпозировании и структурировании предметных данных, но в дополнительном установлении функциональных связей между соответствующими компонентами предметных данных программным путем. Реализация же предлагаемого подхода потребовала установления дополнительных программно-функциональных отношений между

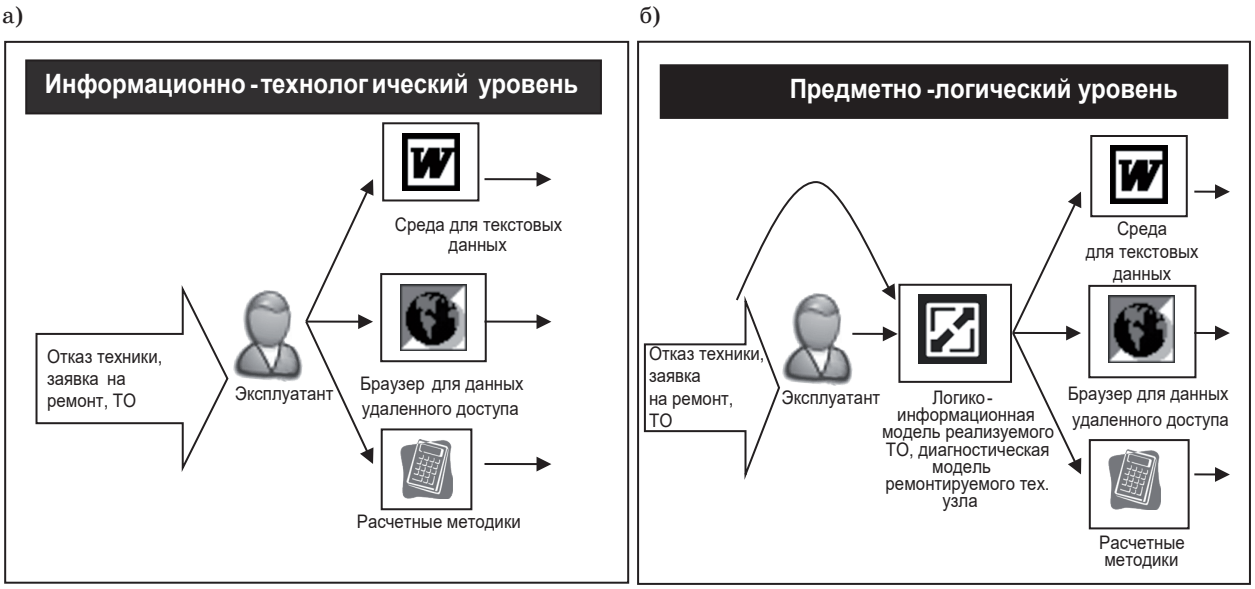


Рис. 1. Различие в рассмотрении взаимодействия эксплуатанта с программной средой ИЭТР на различных уровнях представления

компонентами данных в прикладном программном обеспечении этого ИЭТР, определяемых логической моделью предметного контента.

Таким образом, на предметно-логическом уровне (то есть при синтезе и рационализации логико-информационной модели предметного контента ИЭТР) определяется вся гамма типов и конкретных значений отношений между компонентами данных, изыскиваются оптимальные объемы и формы представления предметных данных пользователю, а на информационно-технологическом уровне производится их программная реализация.

Очевидно, что между компонентами предметных данных гетерогенного характера могут устанавливаться самые различные логические отношения кроме отношений «более общее – частное», типичных для ИЭТР в традиционной концепции их разработки. Так, например, если эксплуатант решает задачу ремонта соответствующего узла авиатехники, то его будет интересовать точный чертеж данного узла (рис. 2, *а*), а если поиска этого узла в составе более сложного агрегата, то ему нужен внешний вид данного узла (рис. 2, *б*).

На информационно-технологическом уровне рассмотрения это означает, что для одного и того же предметного объекта, представленного в контенте ИЭТР в различных (то есть гетерогенных) формах, необходимо установить отно-

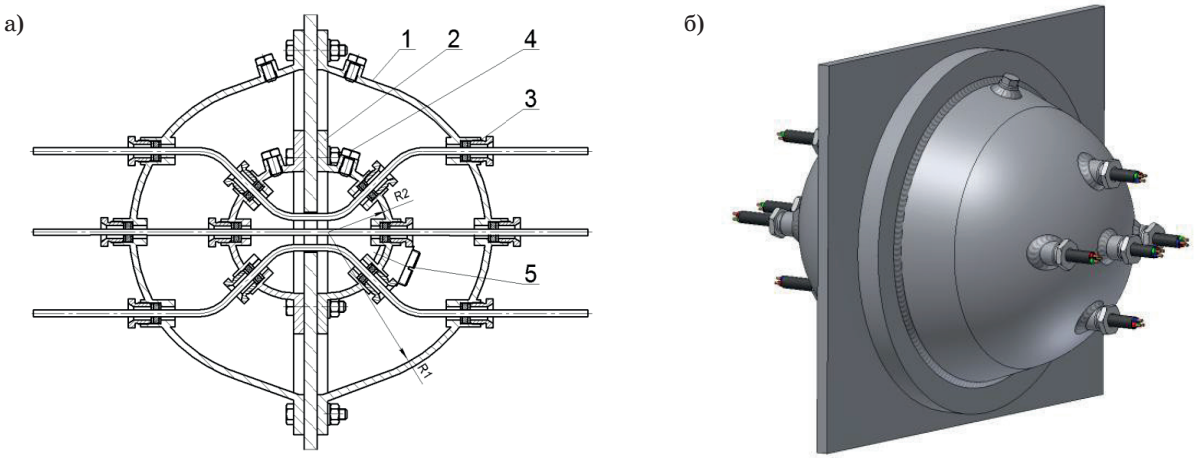


Рис. 2. Пример гетерогенного информационно-графического представления в ИЭТР одного узла авиатехники в зависимости от текущей задачи логистической поддержки

шение логической связи в соответствии с текущей решаемой задачей логистической поддержки эксплуатанта.

Первоначальной базой для определения всей номенклатуры и конкретного множества указанных отношений между компонентами гетерогенных данных предметного контента могут выступать научно-обоснованные модели поиска и обнаружения неисправностей (отказов) авиационной техники, более общие диагностические модели и методы, применяемые в авиационной отрасли, и т. д.

Двухуровневое представление дает принципиально новые возможности по управлению качеством ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники.

В рамках предлагаемой концепции управление качеством ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники осуществляется в рамках соответствующей организационно-технологической системы. Такая система реализуется как форма технологического процесса разработки и создания ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники. По своей этимологии и организации такая система является функциональной системой. Ее обобщенное представление с раскрытием состава и структуры показано на рис. 3.

Реализация функциональности предлагаемой системы предусматривает определяющее значение целеполагания при создании ИЭТР как средства логистической и информационной поддержки эксплуатантов авиационной техники. Именно этот подпроцесс определяет как конечную цель и задачи создания ИЭТР, так и показатели и критерии оценки его качества для принятия итоговых предписаний о потребительской готовности (итоговой технологической результативности).

Наличие строго определенных целей и задач создания ИЭТР позволяет перейти к его проектированию и созданию на предметно-логическом уровне представления. Условно для реализации процессов этого уровня в предлагаемой функциональной системе управления качеством ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники выделяется подсистема разработки контента и исследования образца авиационной техники. Именно ее эффективность определяет качество ИЭТР на предметно-логическом уровне. На данном уровне обеспечивается качество электронного контента ИЭТР по эксплуатации и ремонту

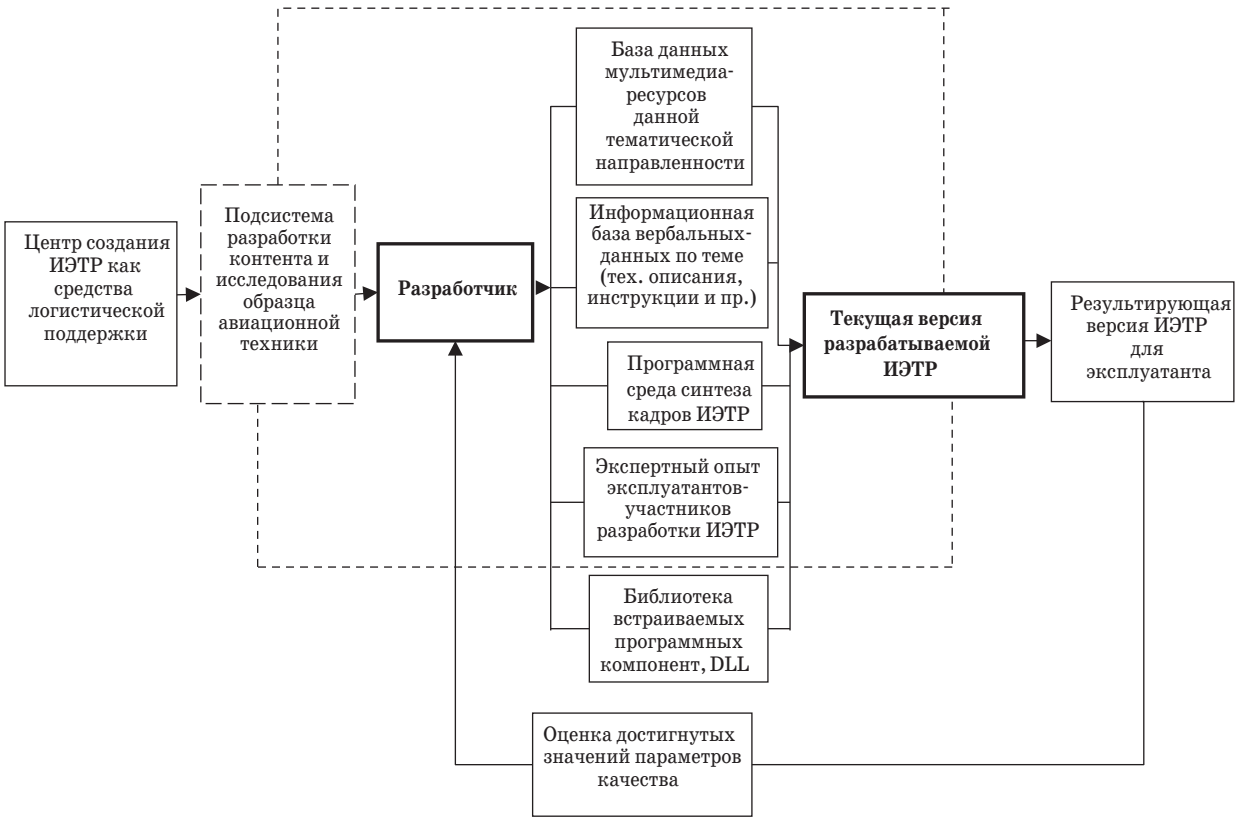


Рис. 3. Состав и структура функциональной системы управления качеством ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники

авиационной техники по следующим сводным показателям:

– целевой характер представления содержательной информации;

– релевантность данных как в полном объеме ИЭТР, так и в каждом из его кадров;

– логическая структурированность предметного контента;

– эффективность применяемых средств визуализации;

– достаточность интерактивности в увязывании обусловленных данных и др.

Основным элементом подсистемы разработки контента и исследования образца авиационной техники является непосредственный разработчик ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники. Он, используя специально сформированный инструментарий разработки, такой как:

– базы данных мультимедиа ресурсов тематической направленности, разрабатываемой ИЭТР;

– информационную базу вербальных и текстовых данных по теме (например, технические описания, инструкции, руководства и пр.),

последовательно осуществляет проектирование электронного контента кадров ИЭТР и синтез их последовательностей в соответствующей программной среде разработки. При этом определяющим фактором обеспечения высокого качества электронного контента является полноценное и эффективное использование разработчиком экспертного опыта эксплуатантов-участников разработки ИЭТР. Такой опыт в рассматриваемой системе может быть представлен в самых разнообразных формах: от привлечения в разработку основного авторитетного специалиста-эксперта до формирования статистически обоснованной группы экспертной поддержки.

Качество ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники на информационно-технологическом уровне рассмотрения определяется возможностями программной среды синтеза кадров и соответствующими библиотеками встраиваемых программных компонент, динамически подключаемыми базами и библиотеками программных функций, программных объектов и пр. Иными словами, качество ИЭТР на информационно-технологическом уровне формируется, определяется и оценивается в рамках традиционных методологий оценки качества программного обеспечения и программно-информационных продуктов [1–2].

При этом ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники в современных условиях рассматривается как программно-информационная система с сервис-ориентированной архитектурой. Ее обобщенная программная архитектура в нотации UML показана на рис. 4.

Вместе с тем в условиях глубокой виртуализации современных ИЭТР все большую популярность получает их распределено-сетевая ре-

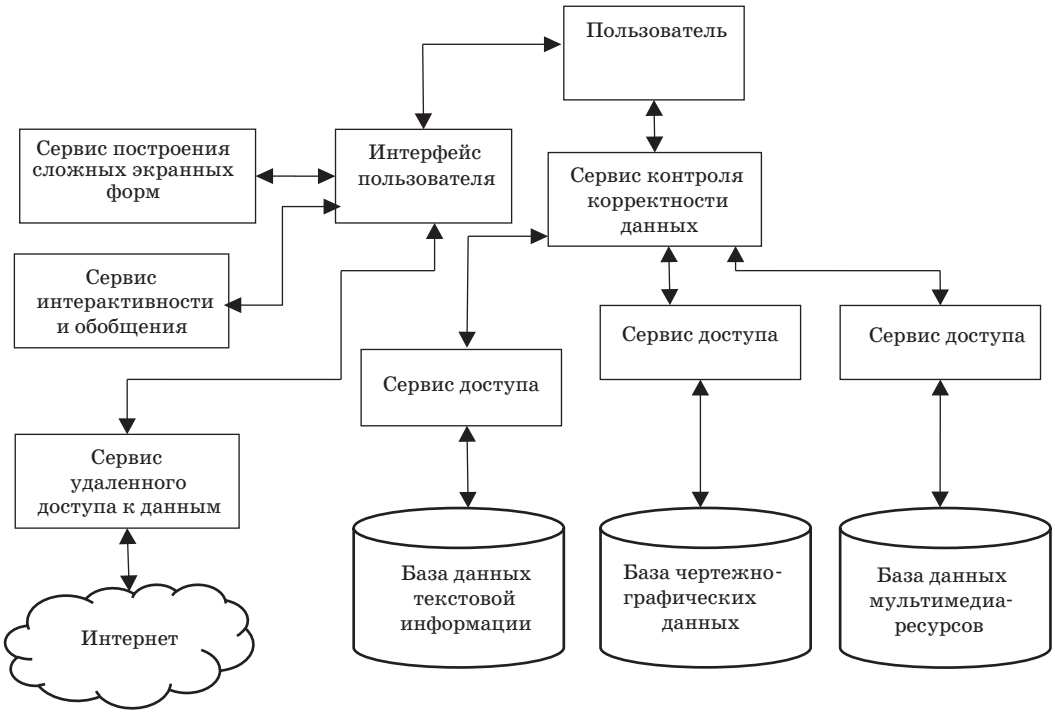


Рис. 4. ИЭТР как программная система с сервис-ориентированной архитектурой

ализация, то есть реализация без физического объединения всей информации в сводной базе данных. Это позволяет добиться высокой степени актуализации данных, используемых в ИЭТР, но в то же время требует поддержания специализированных служб соответствующих центров компетентности. Этот тезис в полной мере относится и к распределено-сетевым реализациям ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники. Обобщенно архитектура указанной реализации ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники показана в нотации UML на рис. 5.

Последовательное формирование и логически-обоснованное увязывание кадров электронного контента в рамках ранее описанных архитектур позволяет за конечное число итераций на базе текущей версии ИЭТР получить его результирующий вариант. Далее осуществляется всесторонняя оценка качества результирующей на данном шаге версии ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники. Оценка качества в рамках представляемой системы носит характер не столько конечного предписания, сколько процедуры выявления текущих аномалий ИЭТР как комплекса электронного контента и как программно-информационного продукта.

Таким образом, предлагаемая функциональная система управления качеством ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники за определенное число итераций позволяет обеспечить требуемый (заданный) уровень качества как на предметно-логическом, так и на информационно-технологических уровнях. Дальнейшая детализация элементов данной системы как базовых основ рассматриваемой научно-методической концепции менеджмента качества ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники позволяет выявить состав научных результатов данной статьи. Сама же научно-методическая концепция менеджмента качества ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники рассматривается как некоторое логическое обобщение всех последующих научных результатов.

Основным принципом структурирования совокупности разрабатываемых методов управления качеством ИЭТР по эксплуатации и ремон-

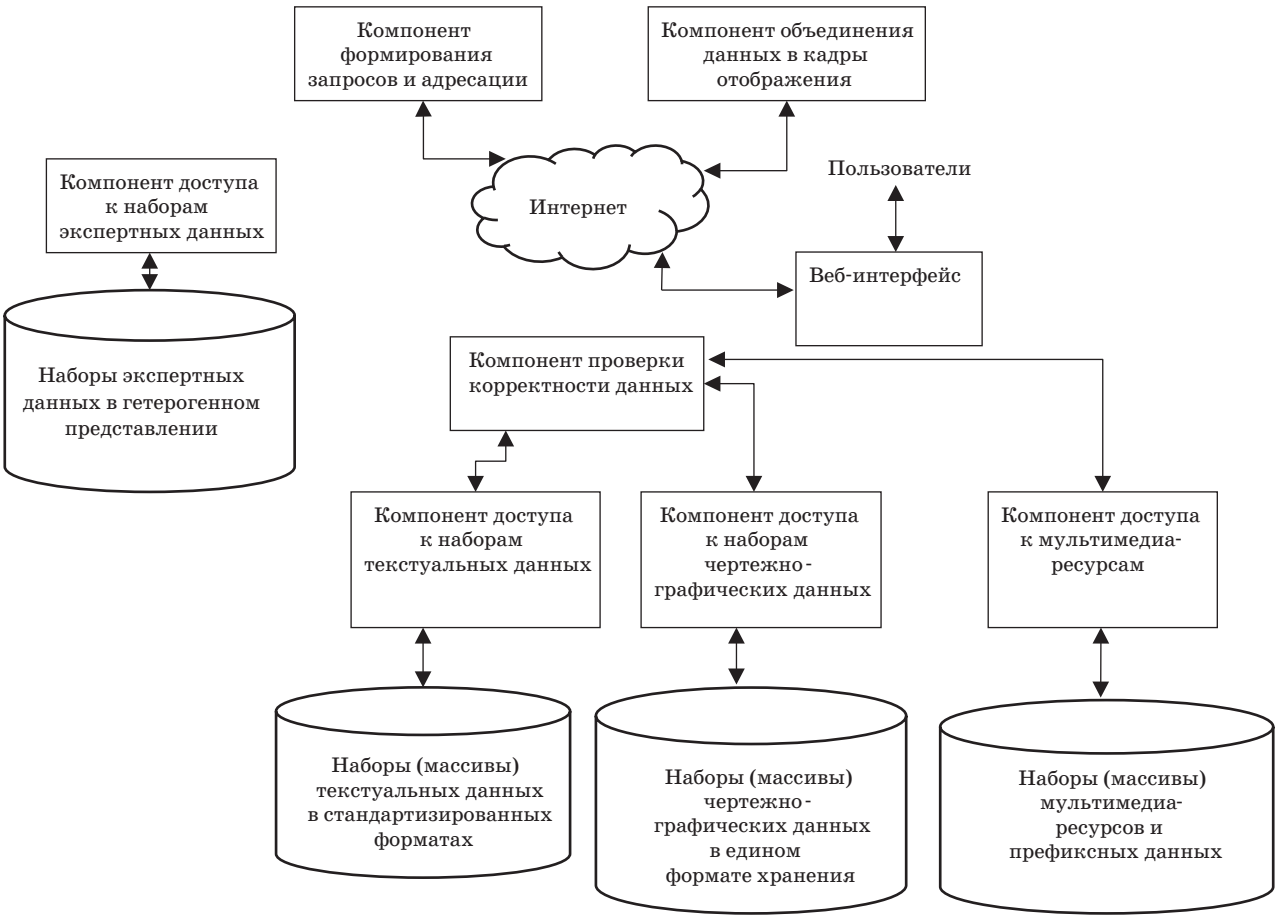


Рис. 5. Распределенная архитектура ИЭТР в обобщенном виде

Таблица 2

Взаимосвязь элементов функциональной системы управления качеством ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиатехники и разрабатываемых методов

№	Базовые элементы функциональной системы управления качеством ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиатехники	Сводный функционал, реализуемый в рамках технологического процесса создания и развития ИЭТР рассматриваемого класса	Цель разработки соответствующего методологического (научно-методического) инструментария управления качеством ИЭТР рассматриваемого класса
1	Разработка контента и исследование образца авиационной техники, работа с неформализованным экспертным опытом	Вербальное описание и графическая репрезентация образца авиатехники; Моделирование процессов функционирования; Формирование и структурирование массивов данных по теме ИЭТР	Рационализация процесса разработки содержательного контента для ИЭТР с обеспечением высоких значений показателей логической связности, структурной гармоничности и информационной релевантности
2	Синтез кадров ИЭТР, структурный монтаж кадров в ИЭТР заданной темы	Интеграция цифровых ресурсов: текстуальных данных, мультимедиа образов, файлов видеопотоковых данных и пр. в соответствии с логической схемой контента, создание системы интерактивных ссылок	Выявление алогичных нарушений в логической декомпозиции содержательного контента, в системе интерактивных ссылок (по типу «логического кольца», «необусловленной ссылки» и пр.)
3	Текущая оценка достигнутых значений параметров качества	Анализ достигаемого уровня качества при проведении итераций разработки в технологическом процессе создания ИЭТР	Оперативный характер текущего состояния разработки, определения соответствия требованиям, присущим эталону, определение эффективных путей наращивания качества
4	Достижение цели создания ИЭТР как средства логистической поддержки	Оценка степени достижения поставленной (итоговой) цели на разработку ИЭТР, оценка интегрального риска для проекта разработки	Применение современных процедур риск-менеджмента в технологическом процессе создания ИЭТР для ремонта и эксплуатации авиационной техники
5	Итеративное улучшение уровня качества текущей версии ИЭТР в процессе разработки (создания)	Принятие мер для снижения интегрального и частных рисков для проекта разработки ИЭТР в условиях ресурсных, бюджетных и пр. ограничений	Выбор путей и методов уменьшения (снижения) рисков для проекта разработки, развития конкретного проекта ИЭТР в условиях объективных ограничений
6	Обеспечение требуемого уровня качества результирующей версии ИЭТР для эксплуатанта	Анализ системного эффекта от качества результирующей версии ИЭТР в процессе обслуживания авиационной техники	Системная оценка влияния ИЭТР на динамику качества обслуживания авиационной техники за счет использования ИЭТР
7	*Обобщающая концепция*: функциональная система управления качеством ИЭТР по эксплуатации и ремонту авиационной техники		

ту авиационной техники является установление логической связи между базовыми элементами указанной системы менеджмента качества, функционалом, который реализуется этими элементами, и целями разработки синтезируемых методов. Существо формирования таких связей наглядно показано в табл. 2.

Определенная на основе описанного принципа совокупность логических связей является задающим мотивом в методолгическом представлении составляющих управления качеством интерактивных электронных технических руководств по эксплуатации и ремонту авиационной техники как способов (вариантов) улучшения качества соответствующих программно-информационных продуктов.

Конструктивом этого представления стало рассмотрение соответствующих составляющих управления качеством интерактивных электронных технических руководств по эксплуатации и ремонту авиационной техники как некоторых сложных характеристик, отображаемых на множество показателей качества заданного класса программно-информационных продуктов. Именно существо такого отображения показано в табл. 2, которая позволяет наглядно обосновать состав и существо научных результатов, разрабатываемых в данной статье.

Соответственно, методологически-обобщающим научным результатом выступает единая научно-методическая концепция менеджмента качества ИЭТР по эксплуатации и ремонту ави-

ационной техники за счет реализации функциональной системы управления качеством указанных интерактивных электронных технических руководств в технологическом процессе их создания и развития. При этом основные усилия концентрируются на подпроцессах улучшения качества электронного контента, его содержательной и репрезентативных составляющих, и предполагается, что оценка и улучшение качества системного ПО в ИЭТР реализуется традиционными методами.

Библиографический список

1. *Бойцов, Б. В.* Внедренческий подход в концепции качества управления. Теоретико-методологические аспекты / Б. В. Бойцов, Ю. В. Крянев // Качество и жизнь. 2016. № 4(12). С. 7–13.
2. *Брукс, Ф.* Мифический человеко-месяц, или Как создаются программные системы / Фредерик Брукс, Хилл Чапел. СПб.: Символ, 2010. 304 с.

УДК 338.2

Г. Н. Иванова
кандидат экономических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
И. В. Чудиновских
Центр региональных проблем экономики качества Института проблем региональной экономики РАН
Н. Е. Цымбал
кандидат экономических наук
ФБУ «Тест – С.-Петербург»

МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВЫМ РАЗВИТИЕМ ОРГАНИЗАЦИИ КАК МИКРОУРОВНЯ ОБЩЕЙ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В статье рассматриваются возможности повышения устойчивости развития организации как микроуровня общей социально-экономической системы за счет построения моделей их функционирования. Проведен обзор ряда существующих моделей и предложена собственная разработка в данной области. Рассматриваются и классифицируются входные факторы, оказывающие воздействие на работу организации, а также выходная информация. Кроме того, предлагается примерный список показателей, а также математический аппарат для количественной оценки степени устойчивости развития.

***Ключевые слова**: устойчивое развитие, организация, стандарты, модели, показатели устойчивого развития.*

G. N. Ivanova
PhD. Economic, Associate Professor
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
I. V. Chudinovskikh
Center for Regional Problems of Quality Economics Institute for Regional Development Issues of the Russian Academy of Sciences
N. E. Tsymbal
PhD. Economic
Test-St. Petersburg

MODELS OF MANAGING SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE ORGANIZATION AS THE MICROLEVEL OF THE GENERAL SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEM

The article discusses the possibility of increasing the sustainability of enterprises as micro-level the overall socio-economic system by building models of their functioning. Surveyed a number of existing models and proposed development in this area. The article examines and classifies the input factors that affect the work of the enterprise, as well as output information. In addition, the proposed sample list of indicators, as well as the mathematical apparatus for quantitative assessments of the sustainability of the development.

***Keywords:** Sustainable development, organizations, standards, models, indicators of sustainable development.*

При разработке документов стратегического планирования для ведущих стран мира стало нормой жизни учитывать понятие «устойчивое развитие». Устойчиво развивающиеся регионы обладают большими возможностями для повышения качества жизни населения за счет по-

вышения инвестиционной привлекательности. Устойчивость развития региона – гарантия возврата вложенных средств инвесторов.

Научные исследования, проводимые в этом направлении, позволили установить, что наиболее весомым фактором, влияющим на устойчивость развития, является повышение качества управления. Достичь результатов возможно, во-первых, применяя в управлении системный подход, то есть рассматривая тот или иной регион (или страну) как единую социально-экономическую систему, а во-вторых, используя при управлении стандарты различного уровня.

Устойчивое развитие принято рассматривать как совокупность трех составляющих: экономического роста, социального развития и охраны окружающей среды. При этом высококачественная материальная основа жизни, то есть повышение качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции, напрямую влияет на все составляющие. Исходя из этого следует признать, что превалирующей составляющей устойчивого развития является экономический рост, который, в свою очередь, зависит от устойчивого развития организаций.

Следовательно, можно рассматривать организации как первооснову устойчивого развития. При этом организация должна рассматриваться не изолированно, а как микроуровень общей социально-экономической системы, то есть необходимо рассматривать всю совокупность воздействующих на нее факторов. Продукция же организации должна удовлетворять не только существующие, но и будущие потребности потребителей. Только такая продукция позволит повысить конкурентоспособность организации, занять лидирующие позиции на рынке, а следовательно, получить гарантии устойчивости своего развития.

Сегодня существует широкий арсенал методов и технических средств управления качеством продукции организаций. Однако все они мало учитывают существующее окружение организации, а также общие тенденции социально-экономического развития.

Отличительной чертой высокого качества управления является решение проблем до их возникновения, то есть необходим предварительный анализ и разработка соответствующих мероприятий. Наиболее целесообразным способом выполнить эти требования является разработка соответствующих моделей управления организацией.

К настоящему времени накоплен немалый опыт в этой области. Для примера рассмотрим модель, предложенную экс-президентом Европейской организации по качеству Тито Конти [2].

Модель представляет организацию как структуру для удовлетворения ожиданий потребителей, акционеров, служащих, которая состоит из отдельных подсистем: управленческой, развития и управления персоналом, отношений с партнерами, внешних отношений и охраны окружающей среды, создания продукции и заботы о клиентах.

Модель показывает, что все подсистемы организации должны работать вместе на достижение целей бизнеса, а менеджмент должен гарантировать универсальное видение задач организации.

В свое время данная модель являлась неплохим инструментом повышения качества управления, а следовательно, и устойчивости развития организации. Однако в те времена считалось, что главная цель компаний и залог устойчивого развития заключаются в том, чтобы снижение затрат сочеталось с высоким стабильным качеством продукции (услуг) и быстрым выходом на рынок. Это достаточно ограниченное понимание устойчивого развития, которое, например, не учитывает экологические аспекты.

Более совершенной по сравнению с моделью Конти является модель общего менеджмента фирмы, основанная на разработках профессора Г. Д. Сегецци [4]. Она рассматривает три уровня управления (нормативный, стратегический, оперативный (текущий)) в трех аспектах (структура, деятельность, поведение), исходя из таких составляющих, как затраты, качество и время.

Наиболее важным из всех компонентов модели является качество. Согласно разработке именно качество является существенным фактором, обеспечивающим преуспевающее положение фирмы. Это более близко к пониманию устойчивого развития, поскольку оно предполагает постоянное повышение качества в экономике, экологии, социальном развитии, ресурсосбережении.

На основе модели Сегецци российскими учеными была разработана модель устойчивого развития организации (рис. 1). Она базируется на расширенной трактовке понятия «устойчивое развитие» (которое включает в число его составляющих ресурсосбережение), использует цикл Деминга и рассматривает три уровня управления.

По оси X расположены управляющие воздействия на базе цикла Деминга – PDCA (Plan – Do – Check – Act), то есть план, действие, проверка, корректировка. По оси Y отображаются составляющие устойчивого развития – эконо-

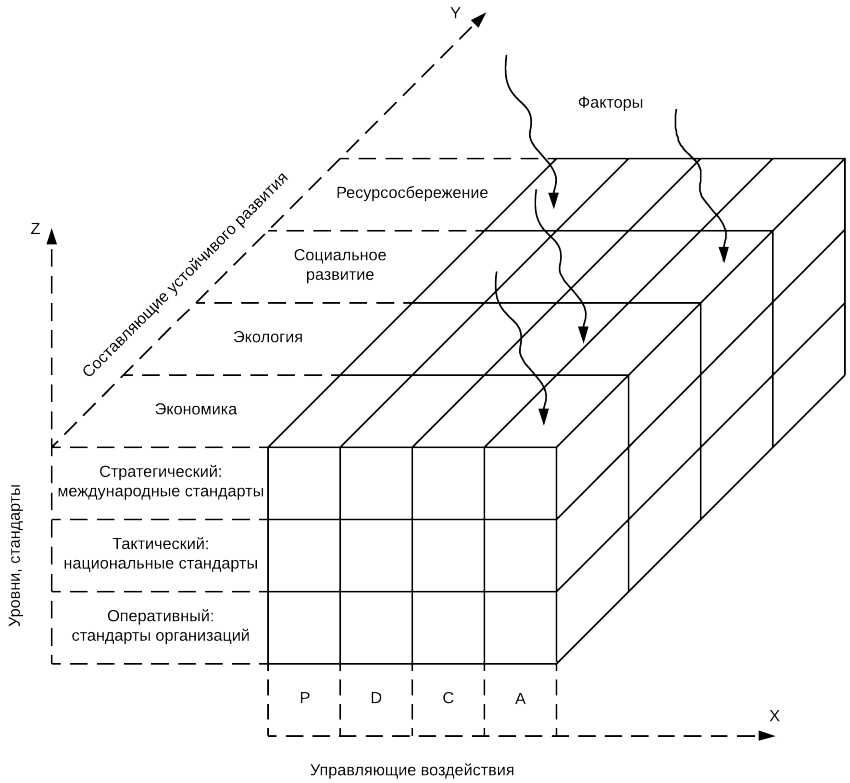


Рис. 1. Модель устойчивого развития организации

мики, экологии, социального развития, ресурсосбережения. По оси *Z* показана специфика управления на микроуровне социально-экономических систем – стратегическом, тактическом и оперативном уровнях.

На стратегическом уровне организации могут использовать стандарты международного, регионального уровня и соответствующие практики, на основе которых разрабатываются стратегические планы в разрезе составляющих устойчивого развития. Эти документы согласуются с региональными стратегическими планами социально-экономического развития.

Тактический уровень управления базируется на стратегических планах и национальных стандартах. Оперативный уровень управления функционирует на базе стандартов организаций и других распорядительных документах. Для каждого уровня управления разработаны схемы функционирования.

Таким образом, предложенная модель отражает поведение системы при внешних и корректирующих воздействиях, а ее структура обеспечивает взаимосвязь элементов.

Разработанная модель отличается возможностью создания единой системы менеджмента организации, впервые интегрирующей все составляющие устойчивого развития. Такая система позволяет осуществлять управление организации по единым принципам, взаимоувязывая различные аспекты, что достигается путем реструктуризации подсистем организации, способствующей повышению уровня зрелости ресурсов.

Рассмотрим функционирование модели. Исходный импульс для начала работы задают воздействующие факторы – внешние и внутренние. Причем внешние факторы, как правило, воздействуют на стратегическом и тактическом уровнях, а внутренние – на тактическом и оперативном. Но независимо от уровня воздействия все происходит по единой схеме. Каждый фактор подвергается анализу с целью выработки плана по его реализации.

Далее в соответствии с циклом PDCA выполняются следующие работы.

На этапе **P (plan)** разрабатываются планы соответствующих мероприятий, а также мероприятия по минимизации последствий возможных рисков или их устранению. На стратегическом уровне это могут быть долгосрочные программы развития, стандарты, планы по развитию корпо-

ративной культуры; на тактическом – служебные инструкции, чертежи, стандарты; на оперативном – приказы, распоряжения (письменные и устные), планы работы производственных участков.

На следующем этапе **D (do)** эти планы реализуются: либо в виде программ, документов, либо в виде продукции, услуг, выполнения мероприятий.

Деятельность подвергается постоянному контролю **C (check)**, который может осуществляться как после выполнения поставленных задач, так и во время деятельности. Данный этап предполагает измерение результатов, сравнение фактических значений с установленными и анализ полученных данных. В результате анализа руководство организации получает объективную картину состояния дел по выполнению заданий.

Обязательным условием устойчивого развития организации является постоянно проводимый мониторинг социально-экономической обстановки в регионе, показывающий, насколько деятельность организации влияет на качество жизни и благосостояние жителей, развитие человеческого капитала в регионе. Эту задачу должен решать менеджмент фирмы.

В процессе мониторинга выявляется не только степень удовлетворения потребностей и нужд населения в продукции организации, но и процессы в регионе с точки зрения демографической, макроэкономической и организационно-управляющей ситуации. Мониторинг дает необходимую основу для определения существующих тенденций, что позволяет прогнозировать появление новых потребностей и нужд, других факторов. Это, в свою очередь, создает основу для упреждающих, корректирующих действий **A (act)**, плана по устранению «узких мест». Контроль эффективен только тогда, когда он работает в профилактическом режиме, заранее устраняя возможные препятствия для выполнения заданий.

По мнению авторов, данная модель обладает несомненными преимуществами, однако необходимо учесть, что для каждой организации могут возникать как дополнительные составляющие, так и новые факторы риска (связанные, например, с изменениями действующего законодательства, социально-экономической обстановки в регионе, наличия ресурсов), оказывающие влияние на ее устойчивость. Для их учета следует предусмотреть возможность введения дополнительных условий для повышения адаптивности модели к деятельности организации.

Также считаем целесообразным применять усовершенствованный цикл Деминга – Шухарта, состоящий из семи шагов: охарактеризовать, изучить, исследовать, найти решение, оценить, реализовать, осуществить мониторинг. Таким образом можно будет определить функционирование модели устойчивого развития организации для каждого уровня управления в соответствии с происходящими бизнес-процессами.

Для идентификации данных процессов можно использовать так называемую цепочку Портера [3], представляющую собой цепочку взаимосвязанных действий по созданию прибавочной стоимости продукции. Однако данная цепочка является наиболее общим случаем, поэтому она может быть преобразована в соответствии с жизненным циклом продукции (рис. 2).

Мы видим, что потребности заказчика являются исходной точкой для запуска данной цепочки (то есть являются воздействующим фактором). Потребности анализируются, и результаты анализа дают информационную основу для проведения исследований, а потом – и для начала производства продукции.

Удовлетворение потребностей заказчика естественным образом приводит к повышению качества, а это не может не вызывать появления новых потребностей.

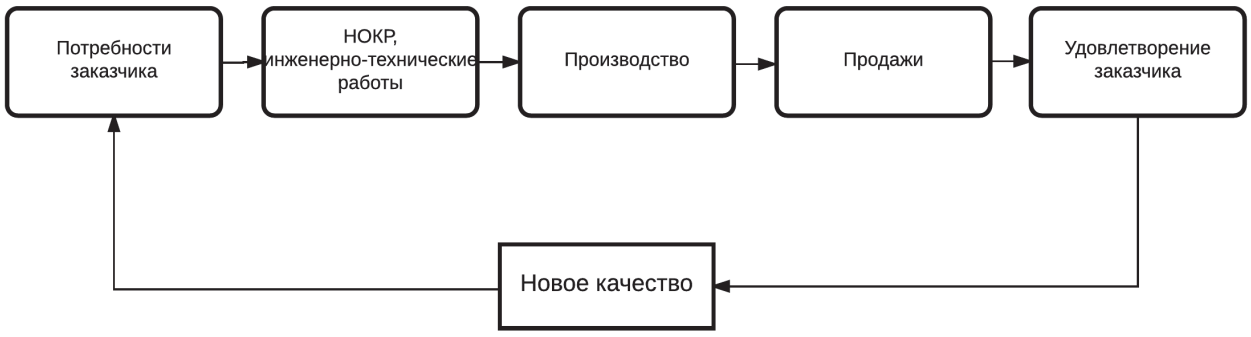


Рис. 2. Жизненный цикл продукции (модернизированная схема Портера)

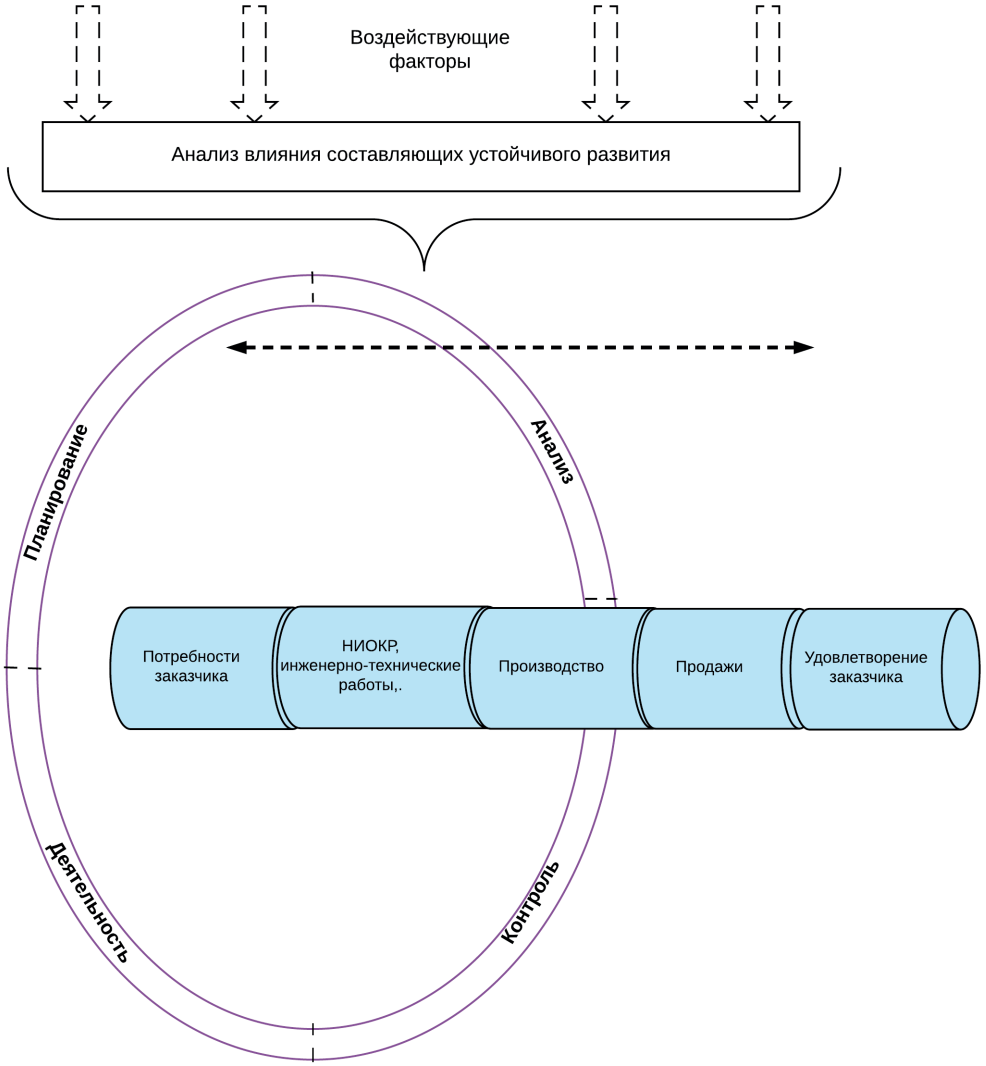


Рис. 3. Схема функционирования модели устойчивого развития для каждого уровня управления

На каждом этапе функционирования мы можем наблюдать все составляющие цикла Деминга – Шухарта.

При разработке схемы учитывались требования стандарта ГОСТ Р ИСО 37101 «Устойчивое развитие административно-территориальных образований. Система менеджмента. Общие принципы и требования».

Схема функционирования модели представлена на рис. 3. Этап анализа в этой модели является самым важным, поскольку здесь требуется не только оценить воздействующие факторы, но и объединить их влияние с учетом всех составляющих устойчивого развития, а также учесть риски для выработки последующих действий.

Результаты анализа являются основой для следующего этапа – разработки планов и программ, которые определят не только цели и направления развития, скорректированные с воздействующими факторами, но и то, кто и что должен сделать для достижения этих целей. Иными словами, какие мероприятия (действия) необходимо для этого провести, в какие сроки и каким структурным подразделениям организации это будет поручено.

На следующем этапе происходит реализация (выполнение) данных программ, которая может быть оценена путем сопоставления текущих значений с установленными в планах. На основе сопоставления и анализа сложившейся ситуации принимаются соответствующие управленческие решения.

Следует подчеркнуть, что модель предполагает не только вертикальные (иерархические), но и горизонтальные связи. Это обусловлено применением единой системы менеджмента и единых приоритетов развития, в числе которых – качество. Постоянному повышению каче-

ства должна быть посвящена вся деятельность фирмы – от разработки долгосрочных программ до ежедневных заданий персоналу.

Необходимо отметить, что функционирование организации характеризуется рядом существенных особенностей, которые усложняют задачу:

– на развитие организации влияет множество объективных и субъективных факторов. Многие из них (например, общественный имидж предприятия) не поддаются точному количественному описанию;

– существующие методы изучения не могут досконально учесть все действующие факторы;

– экономическая ситуация отличается не только сложностью, но и непредсказуемостью. Во многом это связано с тем, что действие экономических законов преломляется через действия людей (потребителей), поведение которых нельзя точно спрогнозировать. В любой момент времени мы можем ожидать появления новых факторов, исчезновение старых. Вследствие этого модель будет построена с некоторой долей допущения.

Очевидно, что факторы, действующие на организацию, можно классифицировать как внешние и внутренние (рис. 4). Внешние факторы – результат внешнего воздействия среды, в которой действует организация. Внутренние факторы отражают условия, складывающиеся внутри организации [5].

В настоящее время зависимость устойчивого развития организации от внутренних факторов достаточно хорошо изучена и описана. Однако сегодня необходимо проводить более тщательный анализ не только внутренних, но и объективных внешних (макроэкономических) факторов.

Современные условия хозяйствования отличаются сложностью и непредсказуемостью, экономическая обстановка характеризуется крайне высокой динамичностью, повышается степень риска, поскольку не исключается положение, когда внешнеэкономические факторы будут иметь отрицательное влияние на устойчивость.

В связи с этим нельзя не отметить, что предлагаемые в стандартах решения в области построения моделей управления организацией не предусматривают гармонизацию данной модели с моделью управления развитием региона. Это, безусловно, снижает эффективность их применения.

Аналогичным образом выходную информацию также можно разделить на объективную и субъективную части (рис. 5). Объективную выходную информацию можно классифицировать и далее – в соответствии с составляющими устойчивого развития: экономические показатели, воздействие на окружающую среду, социальное развитие и ресурсосбережение.

К объективным экономическим показателям, как уже было сказано, можно отнести прибыль, объем производства, рентабельность, объем капитальных вложений и т. д., а также показатели, характеризующие финансовую деятельность организации.

К объективным экологическим показателям, очевидным образом, относятся объем вредных выбросов, количество установленных фильтров, степень загрязнения воздуха, воды, земли вокруг организации.

К объективным социальным показателям относятся наличие социальной составляющей в деятельности организации – различные сти-

Рис. 4. Классификация факторов, воздействующих на организацию

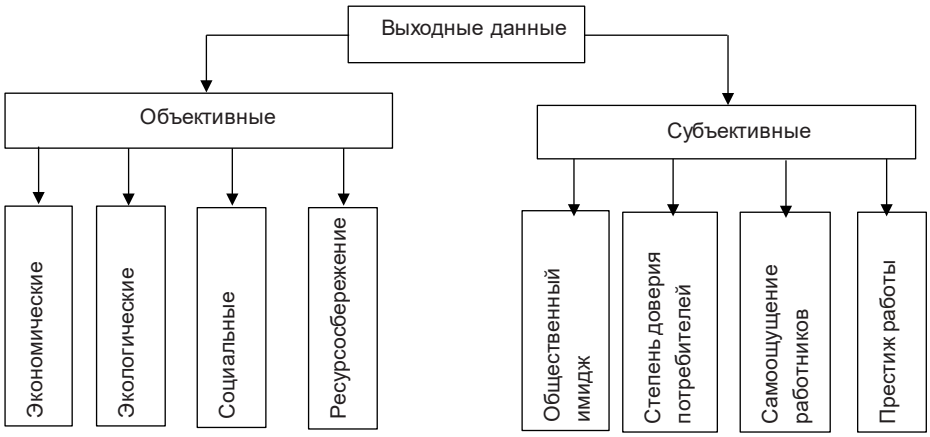


Рис. 5. Структура выходных данных организации

мулирующие выплаты и льготы, наличие дополнительного медицинского страхования, возможность работникам защищать свои права, сохранять свое здоровье, соблюдение работодателем трудового законодательства.

К объективным показателям ресурсосбережения относятся, например, количество применяемых энерго- и ресурсосберегающих технологий, объем сэкономленных энерго- и теплоресурсов, объем отходов, процент отходов, используемых вторично.

Поскольку в выходной информации присутствует субъективная часть, то количественные показатели устойчивости (индикатор устойчивости и список показателей) являются малоинформативными и должны в обязательном порядке сопровождаться словесным описанием развития организации, особенно в области отношений с общественностью (потребителями), ее роли в социальном развитии региона и защите окружающей среды.

Как известно, основная задача управления состоит в достижении некоего заранее определенного оптимума.

Исходя из поставленной цели (достижение организацией устойчивого развития) была выбрана форма представления выходной информации в виде некоторого обобщенного интегрального показателя устойчивости, принимаемого за количественную оценку результата (индикатор результата). При этом предполагается равноправность всех показателей, а их содержательная разнородность и разномасштабность учитывается путем установления соответствующих весовых коэффициентов (определяемых статистическим или экспертным путем). Такой показатель не только позволит наглядно представить и легко спрогнозировать результаты развития организации, но и даст возможность осуществить сравнение различных организаций.

В общем виде показатель устойчивости $УР_{ор}$ может быть определен по формуле

$$УР_{ор} = f(к_i, ф_i), \quad (1)$$

где $УР_{ор}$ – показатель устойчивости; i – номер индикатора устойчивости; к – коэффициент весомости; ф – индикаторы устойчивости.

Однако в настоящее время термин «устойчивое развитие организаций» чаще всего трактуется в узком смысле слова – только как экономическая устойчивость. Соответственно этому строятся системы оценки, предполагающие измерения только экономических показателей деятельности организаций, а этого явно недостаточно.

Определенные возможности для более точной оценки устойчивости развития организаций дают существующие нормативные документы для оценки качества. Так, например, в 2013 году был утвержден национальный стандарт ГОСТ Р 52143-2013 [1], в котором определены основные виды социальных услуг. В стандарт вошло шесть видов социальных услуг:

– социально-бытовые;
– социально-медицинские;
– социально-психологические;
– социально-педагогические;
– социально-экономические;
– социально-правовые.

По каждому виду в стандарте указан перечень конкретных услуг.

Существенным обстоятельством при формировании системы показателей оценки уровня устойчивости развития организации являет-

ся положение о том, что достижение устойчивого развития является не самоцелью. Устойчивое развитие – инструмент, облегчающий достижение главных целей функционирования организации. Авторы считают, что сегодня, выбирая систему показателей, характеризующих устойчивость организации, нужно ориентироваться также на показатели, характеризующие устойчивое развитие региона.

В 2015 году был принят национальный стандарт ГОСТ Р ИСО 37120-2015 «Устойчивое развитие сообщества. Показатели городских услуг и качества жизни». Ориентируясь на показатели, содержащиеся в нем, организация может разработать для себя систему показателей устойчивого развития. Взаимосвязи между показателями устойчивого развития организации (как подсистемы микроуровня) и региона позволят гармонизировать деятельность по общей устойчивости социально- экономических систем.

На основании классификации видов устойчивости можно разработать систему расчетов показателя устойчивого развития организации.

Вначале рассматриваются количественные показатели деятельности организации (ПДО) (табл. 1), на основании которых рассчитывается интегральный показатель устойчивости. Далее проводится оценка реализации главных задач организации, которая может быть выражена через усредненный показатель решения поставленных задач. Затем эти показатели сравниваются, что и дает возможность сделать вывод о том, насколько устойчиво развитие организации.

Количественные показатели могут сопровождаться словесным описанием положения организации, в котором характеризуются социально-экономическая обстановка как в самой организации, так и в том регионе, где она расположена.

Следует отметить, что таблица ПДО является не исчерпывающей, а, скорее, типовой. В зависимости от конкретного вида деятельности организации она может видоизменяться, дополняться или сокращаться.

С учетом данных показателей формула для определения интегрального показателя устойчивости приобретет вид

$$УР_{ор} = f(ЭР_{ор}, СР_{ор}, ЭкР_{ор}, Рсб_{ор}), \quad (2)$$

где $УР_{ор}$ – показатель устойчивости организации; $ЭР_{ор}$ – показатель экономического развития; $СР_{ор}$ – показатель социального развития; $ЭкР_{ор}$ – экологический показатель; $Рсб_{ор}$ – показатель ресурсосбережения.

При этом значение показателя может варьироваться от 0 («абсолютно неустойчиво») до 100 («абсолютно устойчиво») баллов.

Каждый показатель можно рассматривать как совокупность подпоказателей согласно формулам (3)–(6):

$$ЭР_{ор} = f(РП, ПУ, ФЭУ, ОУУ, ИР), \quad (3)$$

где РУ – рыночная устойчивость; ПУ – производственная устойчивость; ФЭУ – финансово-экономическая устойчивость; ОУУ – организационно-управленческая устойчивость; ИР – инновационный рост.

$$СР_{ор} = f(ОЗ, БТ, ОП), \quad (4)$$

где ОЗ – охрана здоровья; БТ – безопасность труда; ОП – обучение и профессиональная подготовка.

$$ЭкР_{ор} = f(ОС), \quad (5)$$

где ОС – защита окружающей среды.

$$Рсб_{об} = f(V_{отх}, От_{пер}, V_{потр}, V_{ср}, V_{эн}), \quad (6)$$

где $V_{отх}$ – объем отходов; $От_{пер}$ – доля отходов, поступающих на переработку; $V_{потр}$ – объем потребленной воды; электро- и теплоэнергии, воздуха, металла; $V_{ср}$ – объем сэкономленных ресурсов; $V_{эн}$ – объем энергии, полученной из альтернативных источников.

Авторы предлагают оценивать каждый подпоказатель в количественном выражении с использованием показателей деятельности организации. Для этого необходимо учитывать удельный вес каждого ПДО, который может варьироваться от 0 до 1 в зависимости от отрасли и вида деятельности организации, возможности возникновения рисков и пр., не превышая в совокупности значения 1.

Таким образом, определение интегрального показателя устойчивого развития организации можно представить как сумму количественных значений *i*-х показателей с учетом их удельных весов, определяемых экспертным путем исходя из специфики работы организации.

Для оценки реализации главных задач организации авторами разработана следующая методика (рис. 6).

Организация проводит анализ уровня решения поставленных главных задач:

– выполнение миссии;

– соблюдение требований законодательства;

– охват рынков;

– удовлетворение потребностей потребителей.

Результат анализа оценивается в баллах.

Далее рассчитывается усредненный показатель решения поставленных задач ($УПР_{пз}$) исходя из уровня решения каждой поставленной задачи.

Таблица 1

Количественные показатели деятельности организации

Составляющие устойчивого развития	Показатели
Экономический рост	
Рыночная устойчивость: – расширение производства; – повышение конкурентоспособности; – расширение рынков сбыта	– объем производства; – объем продаж; – процент лояльности потребителей
Производственная устойчивость: – эффективность использования ресурсов; – эффективность производственной деятельности	– производительность труда; – материало- и энергоемкость продукции; – процент брака; – время производственного цикла
Финансово-экономическая устойчивость: – финансово-хозяйственная деятельность; – платежеспособность	– прибыль; – рентабельность; – объем капитальных вложений; – объем основных и оборотных средств; – доля производственных помещений в общей стоимости недвижимости, принадлежащей организации; – коэффициент обслуживания долга; – капиталовложения в процентах от общих затрат; – доходы из собственных источников в процентах от общих доходов
Организационно-управленческая устойчивость: – эффективность управления; – инвестиционная привлекательность	– наличие в организации сертифицированной системы (систем) менеджмента (качества, экологического менеджмента, менеджмента охраны труда); – наличие системы управления, построенной в соответствии с требованиями стандарта ИСО 22301:2012; – объем сторонних инвестиций
Инновационный рост: – новые технологии; – новые методы производства; – новая продукция	– количество внедренных новых технологий; – количество внедренных изобретений и рационализаторских предложений; – процент обновления ассортимента; – степень изношенности основных фондов; – процент обновления оборудования; – средний возраст оборудования
Социальное развитие	
Социальная сфера предприятия: – охрана здоровья и безопасности труда; – обучение и профессиональная подготовка	– объем социальных выплат и их доля в общих расходах предприятия; – количество дней нетрудоспособности; – количество заболевших; – количество работающих инвалидов; – наличие профессиональных заболеваний; – квалификационный состав персонала – количество сотрудников, прошедших переподготовку; – объем средств, выделяемых на организацию обучения и переобучения персонала, и их доля в общих расходах организации
Охрана окружающей среды	
Экологическая устойчивость	– объем вредных выбросов; – концентрация мелкодисперсных взвешенных частиц (PM2.5) и взвешенных частиц (PM10); – концентрация NO_2 (двуокиси азота) и SO_2 (диоксида серы); – доля выбросов, не проходящих очистку; – шумовое загрязнение; – относительное изменение количества местных видов
Ресурсосбережение	– объем отходов; – доля отходов, поступающих на переработку; – объем потребленной воды, электро- и теплоэнергии, воздуха, металла; – объем сэкономленных ресурсов; – объем энергии, полученной из альтернативных источников

Рис. 6. Методика оценки реализации главных задач

Таблица 2

Оценка интегрального показателя устойчивого развития организации

$0,8 \le УР_{ор}/УПР_{пз} \le 1,2$	$0,4 \le УР_{ор}/УПР_{пз} < 0,8$ $1,2 < УР_{ор}/УПР_{пз} \le 1,6$	$0,4 > УР_{ор}/УПР_{пз}$ $УР_{ор}/УПР_{пз} > 1,6$
Развитие устойчивое	Развитие в относительном равновесии	Развитие неустойчивое

После этого оценивается отношение полученных значений усредненного показателя решения поставленных задач ($УПР_{пз}$) и интегрального показателя устойчивого развития организации ($УР_{ор}$) (табл. 2).

Таким образом, если полученное значение лежит в диапазоне от 0,8 до 1,2 включительно, можно сделать вывод об устойчивом развитии организации. К относительно устойчивому развитию относится соотношение $УР_{ор}/УПР_{пз}$ от 0,4 до 0,8 и от 1,2 до 1,6. Значение $УР_{ор}/УПР_{пз}$ менее 0,4 и более 1,6 свидетельствует о неустойчивом развитии организации.

Следует подчеркнуть, что наиболее важной составляющей системы показателей оценки устойчивости развития является их анализ.

Именно эта информация является основой для разработки разного рода документов и программ, принятия стратегических и тактических управленческих решений. В свою очередь, эти программы и решения приводят к прогрессивным изменениям в организации – внедрению новых технологий, нового оборудования, новых методов производства, что способствует улучшению деятельности организации, повышению качества как его продукции, так и производственной деятельности, то есть ведет к повышению устойчивости развития. Иными словами, мы наблюдаем бесконечный цикл устойчивости (рис. 7).

В заключение следует отметить, что управление устойчивым развитием организации не потребует каких-либо сложных действий, поскольку оно не является чем-то принципиально новым.

Разработка моделей управления устойчивым развитием организации как микроуровня общей социально-экономической системы, гармонизированных с моделями управления устойчивым развитием систем более высокого уров-

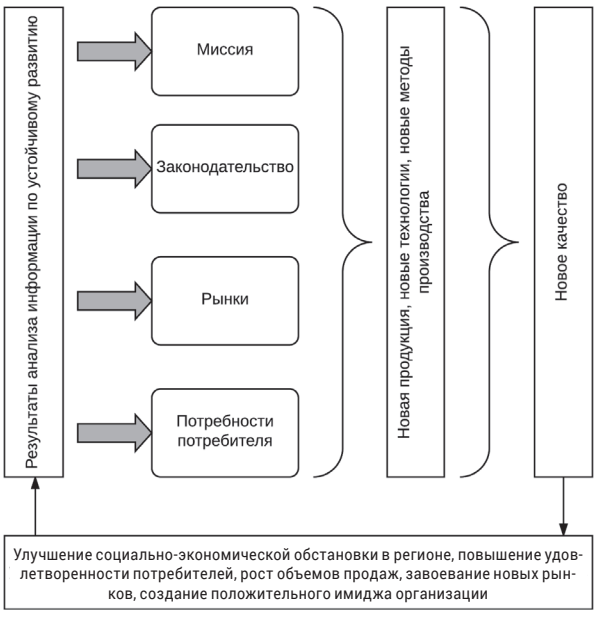


Рис. 7. Бесконечный цикл устойчивости

ня, позволит определить направления совершенствования управления в целях повышения устойчивости развития регионов и улучшения качества жизни населения.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 52143-2003. Социальное обслуживание населения. Основные виды социальных услуг. М.: Изд-во стандартов, 2004.
2. *Конти, Т.* Критический анализ подходов к премиям за качество. М.: ВНИИС, 1995.
3. *Портер, М.* Конкурентное преимущество: как достичь высокого результата и обеспечить его устойчивость / Пер. с англ. Е. Калининой. М.: Альпина Паблишер, 2008. 720 с.
4. *Сегецци, Г. Д.* Политика европейских стран в области управления качеством // Стандарты и качество. 1988. № 5.
5. *Черных, Ю. В.* Стандартизация в управлении устойчивым развитием предприятий. URL: http://unecon.ru/dis-sovety.

УДК 303.732

А. В. Уренцев
аспирант
Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»
С. А. Назаревич
кандидат технических наук
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ КАК ОСНОВА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В статье рассмотрена возможность интеграции инструментов системного анализа с методами оценки надежности сложных технических систем, проведен анализ существующих методов оценки надежности сложных технических систем; система определена как сложная согласно критериальной концепции Л. А. Растригина, проанализировано применение инструментов системного анализа для решения проблем сложных технических систем.

***Ключевые слова**: системный анализ, оценка надежности, сложная техническая система, беспилотный летательный аппарат, экспертные оценки, метод сценариев.*

A. V. Urentsev
PhD. Student
Joint-stock company "Research and Production Enterprise "Radar mms"
S. A. Nazarevich
PhD. Tech.
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SYSTEM ANALYSIS AS THE BASIS OF ESTIMATION OF RELIABILITY OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

The article discusses the possibility of integrating the tools of system analysis with methods for assessing the reliability of complex technical systems, an analysis of existing methods for assessing the reliability of complex technical systems; the system is defined as complex according to the criterial concept of LA Rastrigina, the application of system analysis tools for solving problems of complex technical systems is analyzed.

***Keywords:** system analysis, reliability assessment, complex technical system, unmanned aerial vehicle, expert assessments, scenario method.*

В настоящее время процессы научно-технического прогресса ускоряют в геометрической прогрессии развитие технических систем, таким образом повышается вероятность появления отказов. Усложнение как в части увеличения количества взаимосвязанных и взаимодействующих элементов, так и в количестве и качестве решения многоцелевых задач, поставленных перед технической системой, – это предпосылки для поиска новых решений с целью доминирования в подобном сегменте отрасли отечественной промышленности.

Многозадачность и многофункциональность как следствие увеличения числа конструктивных и функциональных элементов непосредственно влияет на надежность всей системы, что обусловлено отдельно взятыми качественными и надежностными характеристиками, входящими в систему элементов (ЭРИ, ДСЕ, материалы) с очень разветвленной структурой и большим разнообразием внутренних связей составных элементов.

Необходимость проведения комплексных исследований при проектировании, создании и управлении сложными системами стала предпосылкой к возникновению системного анализа, направленного на выработку, принятие и обоснование решений по выбору конкретной альтернативы для достижения заданных целей. Выбор того или иного решения основывается

в первую очередь на значениях показателей надежности сложной системы.

В данной статье будет рассмотрена возможность интеграции инструментов системного анализа с методами оценки надежности сложных технических систем. Для достижения поставленной цели необходимо:

1) провести анализ существующих методов оценки надежности сложных технических систем;

2) определить систему как сложную согласно критериальной концепции Л. А. Растригина;

3) проанализировать применение инструментов системного анализа для решения проблем сложных технических систем.

За объект исследования был взят беспилотный летательный аппарат (БПЛА) с системой искусственного интеллекта в режиме самообучения. В последние годы стали бурно развиваться системы машинного обучения без учителя (*self-supervised learning*). Они отлично проявили себя в ряде задач: навигация, хватание предметов (в робототехнике) и задачах «толкать/тянуть» (интуитивная физика).

Исследователи из Университета Карнеги – Меллона (США) поместили квадрокоптер с нейросетью для самообучения в максимально затрудненное для навигации помещение с большим количеством комнат и мебели. В процессе обучения беспилотник врезался в окружающие предметы 11 500 раз и в результате собрал одну из самых больших в мире баз по авариям БПЛА. Этот отрицательный опыт содержит информацию обо всех возможных способах, какими квадрокоптер может куда-то врезаться [1].

После каждого столкновения корпус и детали БПЛА осматривались и при необходимости заменялись, также в случае фиксации неработоспособности управляющей части БПЛА производился поиск неисправности и ее устранение путем ремонта или замены вышедших из строя элементов полетного контроллера, приемника, электродвигателей или модуля GPS.

Несмотря на сравнительно невысокую стоимость составных частей, суммарная стоимость восстановления БПЛА за все время испытаний оказалась довольно внушительной, также стоит обратить внимание на затраченное на восстановление работоспособности БПЛА время, которое в значительной мере увеличило длительность обучения системы ИИ.

Для наглядности отказы, которые привели к невозможности продолжения эксперимента, были разделены на две группы (отказы механических составных частей и отказы электрорадиоизделий) и представлены в виде диаграмм Парето (рис. 1, 2).

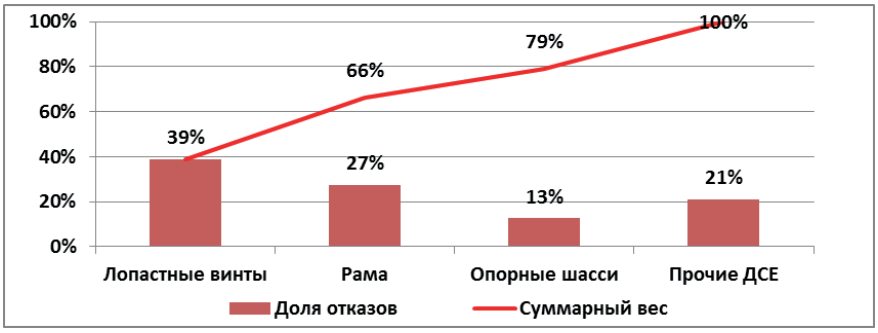


Рис. 1. Диаграмма Парето, отображающая отказы механических составных частей БПЛА

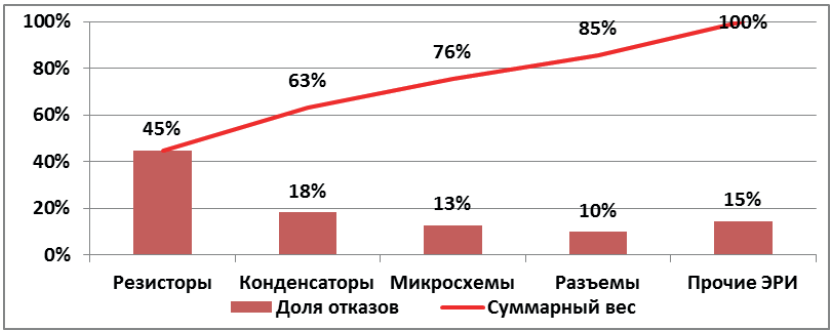


Рис. 2. Диаграмма Парето, отображающая отказы входящих в БПЛА электрорадиоизделий

Рис. 3. Методы оценки показателей надежности

Для того чтобы произвести оценку надежности были проанализированы основные существующие методы (рис. 3).

1. Экспериментальные методы оценки надежности изделий играют особую роль. С одной стороны, они являются, по сути, единственным источником получения исходных данных о надежности объектов, используемых в качестве элементов при построении объектов более сложных, данных, необходимых для аналитического исследования или исследования путем статистического моделирования. С другой стороны, эксперимент в подавляющем большинстве случаев был и остается основным способом определения или подтверждения уровня надежности серийно выпускаемых объектов.

2. Аналитические методы дают возможность оценивать надежность объекта, проводить сравнение различных вариантов его выполнения, находить квазиоптимальные решения на самых ранних этапах разработки и проектирования, когда изделие существует еще только на бумаге. В этом состоит существенное преимущество этой группы методов оценки надежности [1].

3. По постановке задачи к аналитическим методам близки методы статистического моделирования. Сходство в том, что и те и другие методы требуют наличия данных о надежности элементов системы. Однако способы получения результатов совершенно различны. Методы статистического моделирования сводятся к разработке и исследованию функционирования статистической модели исследуемого объекта. Таким путем удается получать оценки надежности объектов с весьма сложной структурой, не поддающихся аналитическому исследованию, при ограниченных затратах средств и времени.

Положительным свойством методов статистического моделирования является также то, что в процессе исследования могут определяться не только надежностные характеристики и показатели, но и показатели эффективности. Основной недостаток этой группы методов состоит в том, что результаты решения представляются не в виде аналитических выражений, отображающих влияние различных факторов, а в виде численных оценок [2, 3].

Однако сложные технические системы обладают рядом критериев, не позволяющих применить к ним напрямую основные существующие методы оценки показателей надежности. Сложная система – это система, состоящая из множества взаимодействующих составляющих (подсистем), вследствие чего сложная система приобретает новые свойства, которые отсутствуют на подсистемном уровне и не могут быть сведены к свойствам подсистемного уровня.

За основу была взята концепция сложной системы, разработанная профессором, доктором технических наук Л. А. Растригиным, который задал следующие критерии соответствия (см. таблицу).

Таблица

Проблемные критерии Л. А. Растригина

№ п/п	Наименование критерия
1	Отсутствие четкого математического описания или алгоритма
2	Нетерпимость к управлению
3	«Зашумленность», выражающаяся в затруднении наблюдения и управления. Обусловлена не столько наличием генераторов случайных помех, сколько большим числом второстепенных (для целей управления) процессов
4	Нестационарность, выражающаяся в дрейфе характеристик, изменении параметров, эволюции во времени
5	Невоспроизводимость экспериментов с ней [3]

Исходя из сформулированных Л. А. Растригиным критериев, сформировался ряд проблем в сложных технических системах:

– математическое моделирование функционирования системы, разработка методов, алгоритмов и программ расчета, анализа и прогнозирования надежности сложных систем;

– испытания на надежность;

– техническая эксплуатация, обеспечивающая высокую надежность системы;

– разработка путей обеспечения и повышения надежности сложных систем при недостаточной надежности составляющих ее элементов.

Для решения проблем, связанных с испытаниями, оценкой и повышением уровня надежности сложных технических систем, целесообразно проанализировать и применить один или несколько инструментов системного анализа.

Системный анализ – совокупность методов и средств, используемых при исследовании и конструировании сложных и сверхсложных объектов, прежде всего методов выработки, принятия и обоснования решений при проектировании, создании и управлении социальными, экономическими, человеко-машинными и техническими системами [5].

Структура системного анализа представляет собой трехуровневое дерево функций, в основе которого лежат три основные задачи: декомпозиция, анализ и синтез (рис. 4).

На этапе декомпозиции обеспечивается общее представление системы в виде подсистем и осуществляется благодаря ряду подзадач: определение и декомпозиция общей цели, основной функции, выделение системы из среды, описание воздействующих факторов, описание тенденций развития, неопределенностей, описание как «черного ящика» и функциональная, компонентная и структурная декомпозиции.

На этапе анализа обеспечивается формулировка детального представления системы путем выполнения одного или нескольких видов анализов: функционально-структурного анализа, морфологического анализа, генетического анализа, анализа аналогов, анализа эффективности, а также формирование требований к создаваемой системе.

Для решения проблемы на этапе синтеза реализуются четыре этапа: разработка модели системы, структурный анализ, параметрический анализ, оценивание системы [6].

В условиях неполноты информации, присущей сложным техническим системам, возникает необходимость использования методов экспертных оценок, то есть методов, основанных на использовании накопленного опыта и знаний, интуиции специалистов в исследуемой области, в том числе данных об аналогах и др. (рис. 5).

При применении метода экспертных оценок при определении показателей надежности особенно важными этапами являются формирование структуры и состава оценочных показателей, а также выбор критерия оценки сложных технических систем.

Наиболее подходящим для решения поставленной цели методом экспертных оценок является метод сценариев. Сценарием называет-

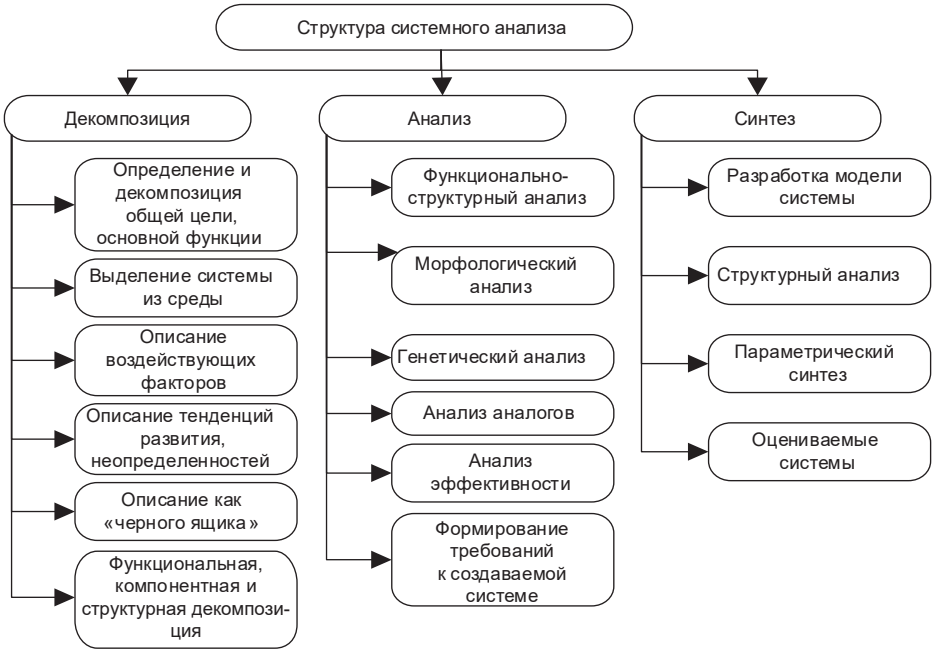


Рис. 4. Структура системного анализа

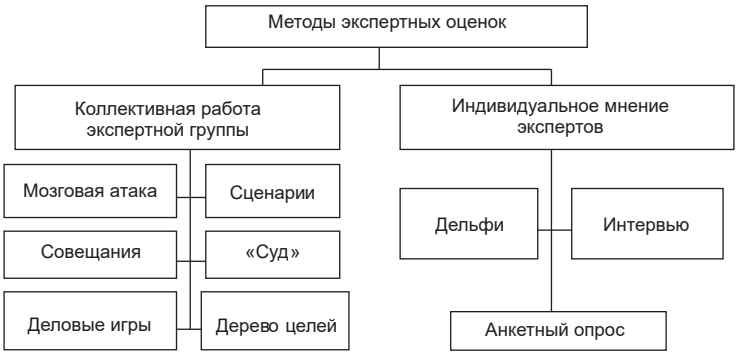


Рис. 5. Методы экспертных оценок в исследуемой области

ся подготовка и согласование представлений о проблеме или об объекте анализа, изложенная в письменной форме.

Основная особенность сценариев заключается в том, что в них даются не только содержательные рассуждения, не упускающие детали, но и результаты количественного технико-экономического анализа или статистического анализа с предварительными выводами. На практике с помощью метода сценариев разрабатываются прогнозы в отраслях промышленности, основанные на отчетах и справках отделов надежности, управления качеством, специального конструкторского бюро [7].

Считается, что сценарии для прогнозирования развития сложных систем начал использовать Герман Кан. Первые из разработанных сценариев носили преимущественно описательный характер. Впоследствии метод сценариев был в значительной степени развит за счет более точных качественно-количественных моделей [8].

Разработанный широкий спектр возможных альтернативных вариантов развития ситуации позволяет более полно определить критические ситуации для принятия решений, а также возможные последствия предлагаемых альтернативных вариантов решений с целью их сопоставления и выбора наиболее эффективного.

Профессионально разработанный и периодически актуализируемый прогноз – неотъемлемая составляющая процесса выработки и принятия важных управленческих решений [9, 10].

Благодаря применению экспертных оценок в совокупности с методами оценки надежности решаются стоящие перед сложными техническими системами проблемы в части проведения испытаний, математического моделирования, прогнозирования и повышения надежности данных систем.

Использование полученных результатов при использовании метода сценариев и значений, полученных в процессе расчета надежности, позволяет дать адекватную оценку по всем критериям сложной технической системы, способствует оптимизации процесса поиска и принятия соответствующего решения в рамках сформулированных проблем сложных технических систем.

Библиографический список

1. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. М.: Изд-во стандартов, 1996. 16 с.
2. Learning to Fly by Crashing. URL: https://arxiv.org/abs/1704.05588.
3. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование / О. П. Глудкин, А. Н. Енгалычев, А. И. Коробов, Ю. В. Трегубов; под ред. А. И. Коробова. М.: Радио и связь, 2002. 272 с.
4. *Растригин, Л. А.* Адаптация сложных систем. Рига: Зинатне, 1981. 375 с.
5. *Наппельбаум, Э. Л.* Системный анализ как программа научных исследований – структура и ключевые понятия // Системные исследования. Методологические проблемы. М., 1980. 120 с.
6. *Лебедев, А. А.* Введение в анализ и синтез систем: учеб. пособие. М.: Изд-во МАИ, 2001. 352 с.
7. *Семенов, С. С.* Анализ методов принятия решений при разработке сложных технических систем / С. С. Семенов [и др.] // XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. 2014. С. 8101–8123.
8. *Литвак, Б. Г.* Стратегический менеджмент: учебник. М.: Юрайт, 2013. 507 с.
9. *Семенов, С. С.* Основные положения системного анализа при оценке технического уровня сложных систем с применением экспертного метода // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 4. С. 45–53.
10. *Назаревич, С. А.* Системный анализ технических характеристик, формирующих инновационность продукции / С. А. Назаревич, С. Л. Поляков // Системный анализ и логистика. 2016. № 12. С. 81–86.

УДК 62-1/-9

С. А. Назаревич
кандидат технических наук
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В статье рассмотрены вопросы новизны технической продукции как объекта анализа с точек зрения следующих научно-прикладных направлений: инноватика и теория качества. Новизна продукта может определяться уровнем продаж в процессе жизненного цикла, когда по достижении предела новизны продукт становится традиционным или устаревшим. В статье представлен способ выявления происхождения нового продукта и методика расчета степени новизны его значимых характеристик.

***Ключевые слова**: новшество, инновация, новизна, качество, структура, критерии оценки новизны, нововведение, модернизация.*

S. A. Nazarevich
PhD. Tech.
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

DIAGNOSTIC MODEL FOR MODERNIZATION OF STRUCTURE OF TECHNICAL SYSTEM

The article considers the questions concerning the degree of novelty of technical products, as an object of analysis from the different points of view of the following scientific and applied directions: innovation and quality theory. The novelty of a product can be determined by the level of sales during the life cycle, when, upon reaching the limit of novelty, the product becomes traditional or obsolete. Therefore, the article presents a way to identify the origin of a new product and the methodology for calculating the degree of novelty of its significant characteristics.

***Keywords:** innovation, innovation, novelty, quality, structure, criteria of novelty evaluation, innovation, modernization.*

Анализ проблемной области

Основной проблемой радиоэлектронной отрасли является распространенная ситуация на предприятиях, разрабатывающих новую радиоэлектронную продукцию, которая связана с контролем результатов инновационной деятельности на предмет оценки соответствия полученных результатов современным требованиям и потребностям целевого сегмента рынка.

Принципы опережающей стандартизации, положенные в основу процессов проектирования новой продукции в период с 1960-х до 1970-х годов, позволили создать продукцию с большим внутренним потенциалом для модернизации на протяжении долгих лет. Такие принципы действовали для достаточно широкого круга отраслей, и отечественная продукция технического и промышленного назначения всегда отличалась высокой надежностью, глубоким потенциалом для модернизации и, к сожалению, низкой технологичностью.

Наличие достаточного доступа к природно-сырьевой базе отразилось на отношении безотказной работы и мощности отечественной техники к экономичности расхода полезного ресурса для ее эксплуатации. Процессы перехода на новые принципы использования природно-сырьевой базы создают предпосылки для создания принципиально новой продукции, содержащей как научную, так и техническую новизну, и постепенного отказа от используемой в настоящем продукции, имеющей ярко выраженные признаки морального старения.

Однако вопросы, связанные с оценкой технической и научной новизны экспериментальной продукции, остаются открытыми. Можно ли считать новую продукцию лучшей? Расширение рабочего диапазона параметров, значимых для потребителя, или реализация новых функциональных параметров на текущей продуктовой линейке?

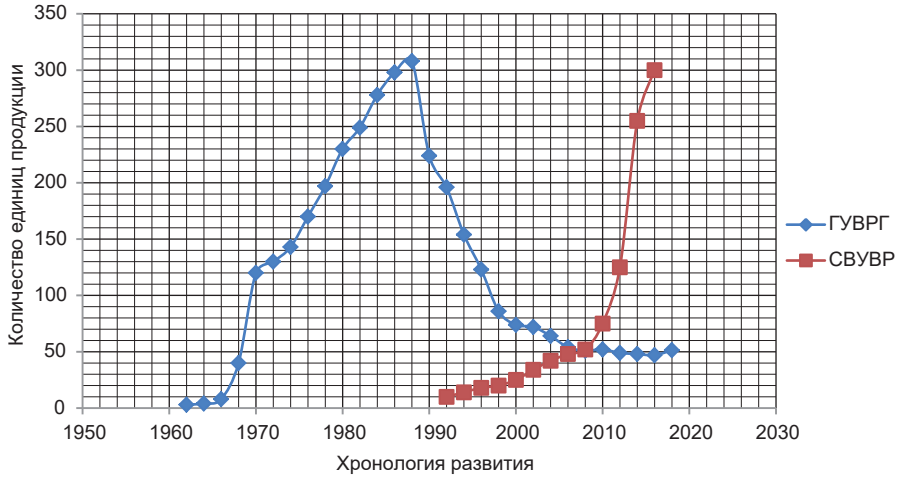


Рис. 1. Хронология развития технических систем

Ответ заключается в исследовании рынка или так называемом голосе потребителя, который является первейшим индикатором конкурентоспособности выбранной стратегии предприятия. Проведенные исследования основаны на данных ретроспективного анализа и дают повод для следующего суждения: нет абсолютно нового продукта, есть степень отличия от базового образца.

В качестве примера представлен проект «Технология круглогодичного производства в культивационных сооружениях высококачественной экологически безопасной растительной продукции» (СВУВР), который основан на световегетационной установке для выращивания растений и является улучшающей инновацией, воплощенной на основе базовой версии продукта «гидропонная установка для выращивания растений» (ГУВРГ).

Развитие характеристик новой продукции останавливает существующие ограничения, действующие как в научно-техническом прогрессе, так и в социальной среде. Научно-технические ограничения связаны с использованием только тех технологий, которые доступны к тиражированию для крупносерийного производства, однако более эффективное использование новой продукции еще зависит от требований, установленных социальными стандартами рынка обращения.

Практическая значимость

Разработанная методика позволяет определять степень изменения технических характеристик новой продукции по отношению к текущему аналогу или принятому прототипу. Набор технических (X) и социальных (Y) требований, предъявляемых к продукции в виде технического задания, создают функциональную значимость проектируемой продукции (Z), их развитие снимает ограничения социальной значимости (ОСЗ), ограничения уровня техники (ОУТ).

$$Q_{\text{развитие новой продукции}} = \begin{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1, X_2, X_n \\ Y_1, Y_2, Y_n \end{Bmatrix} \\ \text{ТЗ}\langle Z_1(X_1, Y_1), Z_2(X_2, Y_2), Z_n(X_n, Y_n)\rangle \\ Z_2(X_2, Y_2) \Rightarrow Z_{2'}(X_{2'}, Y_{2'}) \\ \text{ОСЗ} > Z_{2'}(X_{2'}, Y_{2'}) \Rightarrow Z_{2'} = \text{ТЗ} \\ \text{ОУТ} > Z_{2'}(X_{2'}, Y_{2'}) \Rightarrow Z_{2'} = \text{ТЗ} \\ \text{ТЗ} \Rightarrow \max \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Практическое решение заключается в применении методики анализа степени измерения характеристик продукции. Количественное отношение требований к степени изменения технических характеристики продукции к общему количеству технических характеристик базовой структуры создает результат степени прогрессивности новой продукции, которая должна соответствовать всем ожиданиям значимых сторон. Полученные результаты сравнивают со значениями в табл. 1.

Основная сложность применения методики состоит в определении потребительских характеристик, которые устанавливаются социальными стандартами с нечеткими требованиями. Для анализа потребительских характеристик используется аппарат нечеткой логики.

Для комплексного анализа степени изменения продукции следует использовать нормативную документацию на эксплуатацию продукции и результаты данных, полученных от специализированных центров обращения к потребителям ценности продукции. Основная

Таблица 1

Анализ степени измерения характеристик продукции

Наименование изменений характеристик продукции	Значение изменений	Характеристика результатов изменений	
Степень изменения потребительских характеристик (I_{12})		Степень прогрессивности новшества (I_{13})	Создаваемый социальный эффект (I_{14})
$I_{12}=\frac{P_{\text{ус.пот.хар}}}{P_{\text{общ.усов.потр.хар.}}}$	0,2	Улучшение второстепенных характеристик объекта нововведения	Недостижение социальных требований (стандартов)
$P_{\text{ус.пот.хар}}$ – количество усовершенствованных потребительских характеристик			Обеспечение отдельных социальных требований
$P_{\text{общ.кол.пот.хар}}$ – общее количество потребительских характеристик	0,4	Улучшение основных характеристик объекта нововведения	Обеспечение социальных требований (стандартов)
Степень изменения технических характеристик (I_{11})	0,7	Существенное превышение основных характеристик объекта	Улучшение предусмотренных нормами отдельных социальных требований
$I_{11}=\frac{P_{\text{ус.тех.хар}}}{P_{\text{общ.кол.тех.хар}}}$	0,8	Значительное превышение основных характеристик объекта нововведения	Улучшение всего комплекса норм
$P_{\text{ус. тех. хар}}$ – количество усовершенствованных технических характеристик	1	Достижение качественно новых характеристик	Значительное превышение уровня социальных требований
$P_{\text{общ.кол.техн.хар}}$ – общее количество технических характеристик	2	Получение новой продукции, впервые освоенной в народном хозяйстве	Превышение мирового уровня социальных требований

сложность состоит в определении потребительских характеристик, которые устанавливаются социальными стандартами с нечеткими требованиями (рис. 2).

$$Q=\left(\frac{P_{\text{ус.пот.хар}}}{P_{\text{общ.усов.потр.хар}}}\right)+\left(\frac{P_{\text{ус.тех.хар}}}{P_{\text{общ.кол.тех.хар}}}\right). \quad (2)$$

Полученные результаты сравнивают со значениями в табл. 2. Все наименования изменений, указанные в таблице, соответствуют нормативно-технической документации, регламентирующей обращение используемых терминов (рис. 3).

$$\mu_{Q1}=\begin{cases} y=0, \text{если } x<0{,}1 \\ \dfrac{x-0{,}1}{0{,}2-0{,}1}, \text{ если } 0{,}1<x<0{,}2 \\ y=1, \text{если } 0{,}2<x<0{,}6 \\ \dfrac{0{,}2-x}{0{,}6-0{,}2}, \text{ если } 0{,}2<x<0{,}6 \\ y=0, \text{ если } x>0{,}7 \end{cases},$$

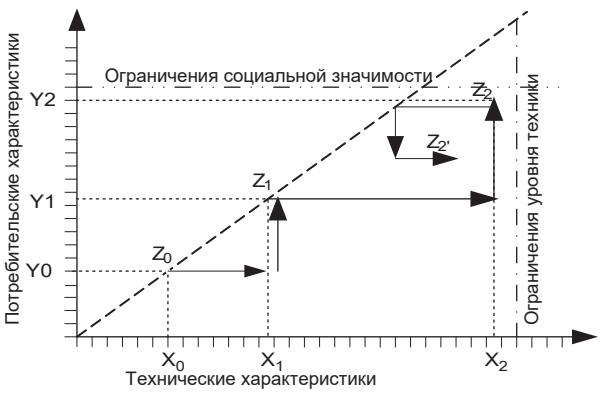


Рис. 2. Схема развития потенциала технического изделия

Таблица 2

Шкала интерпретаций результата

№	Значение	Обозначение	Наименование изменения
1	0,2	Q1	Модификация
2	0,4		
3	0,6		
4	0,8	Q2	Поверхностное усовершенствование
5	1,0		
6	1,2	Q3	Глубинное усовершенствование
7	1,4		
8	1,6	Q4	Модернизация
9	1,8		
10	2,0	Q5	Инновация

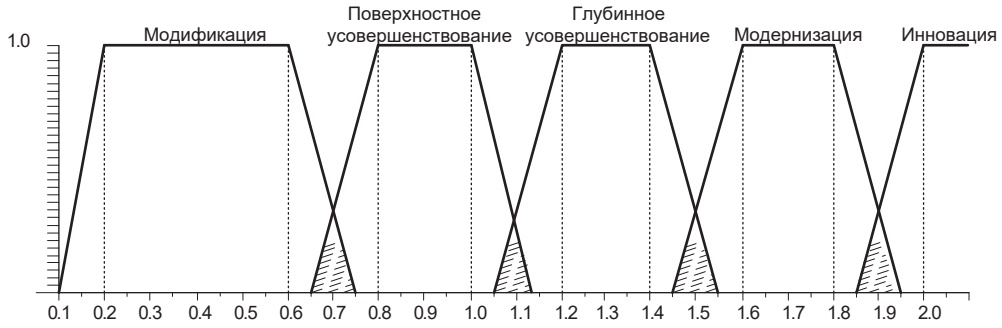


Рис. 3. Функции принадлежности для наименований изменений

$$\mu_{Q2}=\begin{cases} y=0, \text{если } x<0,6 \\ \dfrac{x-0,1}{0,2-0,1}, \text{ если } 0,6<x<0,7 \\ y=1, \text{если } 0,8<x<1,0 \\ \dfrac{0,2-x}{0,6-0,2}, \text{ если } 0,8<x<1,0 \\ y=0, \text{ если } x>1,1 \end{cases},$$

$$\mu_{Q3}=\begin{cases} y=0, \text{если } x<1,0 \\ \dfrac{x-0,1}{0,2-0,1}, \text{ если } 1,0<x<1,1 \\ y=1, \text{если } 1,2<x<1,4 \\ \dfrac{0,2-x}{0,6-0,2}, \text{ если } 1,2<x<1,4 \\ y=0, \text{ если } x>1,5 \end{cases},$$

$$\mu_{Q4}=\begin{cases} y=0, \text{если } x<1,4 \\ \dfrac{x-0,1}{0,2-0,1}, \text{ если } 1,4<x<1,5 \\ y=1, \text{если } 1,6<x<1,8 \\ \dfrac{0,2-x}{0,6-0,2}, \text{ если } 1,6<x<1,8 \\ y=0, \text{ если } x>1,9 \end{cases},$$

$$\mu_{Q4}=\begin{cases} y=0, \text{если } x<1,8 \\ \dfrac{x-0,1}{0,2-0,1}, \text{ если } 1,8<x<1,9 \\ y=1, \text{если } 1,9<x<2,0 \\ \dfrac{0,2-x}{0,6-0,2}, \text{ если } 1,9<x<2,0 \end{cases}.$$

Заключение

Предложенные подходы позволяют формировать инвариантные параметрические модели, основанные на результатах анализа изменения сложных технических изделий, применение которых обеспечивает выполнение требований к изменениям новизны, что создает рост потребности рынка в продукции подобного рода, тем самым создавая новые социальные стандарты.

Библиографический список

1. *Менш, Герхард.* Базисные инновации и инновации совершенствования // Журнал экономики предприятия. № 42. 1972. С. 291–297.
2. *Варжапетян, А. Г.* Обеспечение качества технических средств автоматизации / А. Г. Варжапетян, Г. И. Коршунов. ЛО «Машиностроение», 1981.
3. *Дубов, Ю. А.* Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем / Ю. А. Дубов, С. И. Травкин, В. Н. Якимец. М.: Наука, 1986. 135 с.
4. *Беляков, Г. П.* Исследование содержания понятий: техническое перевооружение, техническое переоснащение, модернизация / Г. П. Беляков, Д. В. Еремеев // Сибирский журнал науки и технологий. 2011. № 3(36). С. 177–182.
5. *Белоусов, В. И.* О критериях оценки значимости нововведений. Управление инновационными процессами // Межрегиональный информационно-аналитический журнал «Инновационный Вестник Регион». Воронеж. № 4. 2007. С. 52–57.
6. *Назаревич, С. А.* Модели оценки качества профильной и инновационной продукции предприятий / С. А. Назаревич, Н. Н. Рожков, С. Л. Поляков // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 6. С. 40–46.
7. *Коршунов, Г. И.* Методика первичной оценки инновационных проектов для последующей реализации на промышленном предприятии / Г. И. Коршунов, А. М. Дозмаров // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 10. С. 60–64.
8. *Коршунов, Г. И.* Оценка эффективности технологической модернизации сборочно-монтажного производства РЭА / Г. И. Коршунов, В. М. Балашов, С. Л. Поляков // Вопросы радиоэлектроники. 2013. Т. 2. № 2. С. 100–109.
9. *Назаревич, С. А.* Методика оценки инновационности продукции // Фундаментальные исследования. 2015. № 3-0. С. 119–123.
10. *Назаревич, С. А.* Системный анализ технических характеристик, формирующих инновационность продукции / С. А. Назаревич, С. Л. Поляков // Системный анализ и логистика. 2016. № 12. С. 81–86.

УДК 658.562.63

Е. Г. Семенова*
доктор технических наук, профессор
М. В. Шанта*
аспирант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА БЫТОВОЙ ТЕХНИКИ

В статье разработана методика оценки качества бытовой электротехники. Разработан реестр потребительских свойств с определением параметров оценки, единиц измерения и нормативной документации, регулирующей требования к продукции, для стиральной машины. Применение реестра потребительских свойств, разработанного на основе описанной методики, служит критерием для оценки качества бытовой техники на этапе проектирования, серийного производства, а также для проведения сравнительного анализа между моделями собственного производства и продукцией других производителей.

***Ключевые слова**: потребительские свойства, чек-лист, качество, уровень технических отказов.*

E. G. Semenova*
PhD. Tech., Professor
M. V. Shanta*
PhD. Student
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

METHODIC OF QUALITY EVALUATION FOR HOUSEHOLD APPLAINCES

The article presents methodic of quality evaluation properties for household appliance. In article developed list of properties most important for customer for washing machines with definition of parameters for evaluation, definition of measurement methods and standards according to product requirements. Developed list of properties based on described methodic is used as criteria for quality evaluation for products in development phase, in serial production and to compare models of own production and other producers.

***Keywords:** customer properties, check list, quality, technical call rate.*

Простые и удобные методики оценки качества необходимы для того, чтобы в краткие сроки оценить уровень качества продукта, сделать сравнительный анализ между своей продукцией и продукцией конкурентов, проанализировать, какие модели с точки зрения качества более успешны на рынке.

Применение методики оценки качества позволяет определить жизнеспособность продукции, а следовательно, успешность предприятия. Чтобы разработать методику оценки качества, необходимо тщательно изучить потребности покупателей и реализовать их в потребительских свойствах продукции.

Совершенствование потребительских свойств является непрерывным процессом, поэтому необходимо постоянно актуализировать и упорядочивать наименования потребительских свойств, разрабатывая новые показатели, необходимые для оценки качества бытовой техники.

В нормативной документации установлены основные параметры и технические требования, но нет единого реестра номенклатуры потребительских свойств и их показателей, не учтены современные технологии. В связи с этим необходимо разработать единый реестр и обзор потребительских свойств с опорой на нормативную документацию.

На базе анализа потребительских свойств разработана методика оценки качества бытовой техники, включающая следующие этапы:

1) определить группы потребительских свойств согласно требованиям нормативной документации;

2) составить развернутую номенклатуру показателей для каждой группы потребительских свойств;

3) определить метод измерения каждого показателя;

4) определить нормативную документацию, в соответствии с которой регулируется тот или иной показатель, если таковая имеется;

5) составить реестр потребительских свойств, который будет использоваться в виде чек-листа при оценке качества продукта.

В существующих исследованиях авторы выделяют следующие группы потребительских свойств:

– свойства целевого назначения;

– надежность;

– эргономические свойства;

– эстетические свойства;

– экологические свойства;

– свойства безопасности;

– экономичность продукции [1].

В некоторых исследованиях дополнительно рассматриваются экологические аспекты влияния на основные потребительские свойства продукта [2].

На основе существующих исследований, а также требований национальных стандартов (ГОСТ Р МЭК 60456-2011, ГОСТ Р 56478-2015, ГОСТ IEC 60335-1-2015) авторами статьи выделены следующие группы потребительских свойств:

– безопасность (для здоровья, жизни и имущества потребителя);

– надежность (свойство выполнять требуемые функции в условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования согласно спецификации в течение заявленного времени);

– функциональность (основные и вспомогательные функции);

– эргономичность (удобство пользования, гигиеничность, безвредность);

– экономичность (затраты на приобретение и эксплуатацию);

– эстетичность (способность внешнего вида удовлетворять потребности потребителя) [3–5].

В качестве примера в статье разработан реестр потребительских свойств оценки качества стиральной машины. Согласно предложенной методике для каждой группы потребительских свойств разработан показатель более низкого уровня, позволяющий оценить качество прибора, уровень удовлетворенности потребителей и степень соблюдения требований стандартов.

Функциональные свойства можно представить следующей моделью:

$$ФС = F(ОБ, КП, ЭО, ИБ, ПР),$$

где ОБ – показатель отстирываемости белья. Показатель отстирываемости измеряется индексом эффективности стирки. Оценка качества полоскания (КП) производится за счет измерения остаточной щелочности. Эффективность отжима (ЭО) характеризуется показателем остаточной влажности белья после отжима и оценивается при помощи присваивания стиральной машине класса отжима: чем выше класс, тем с большей скоростью вращается барабан в процессе отжима и тем меньше остаточная влажность белья.

Существует семь классов отжима: от самого высокого (A) до самого низкого (G). Индексы эффективности класса отжима представлены в табл. 1.

Таблица 1

Классы отжима

Класс	Влажность белья после стирки	Скорость отжима, об/мин
A	Менее 45%	1600
B	От 45 до 54%	1400
C	От 54 до 63%	1200
D	От 63 до 72%	1000
E	От 72 до 81%	800
F	От 81 до 90%	600
G	Более 90%	400

Износ белья (ИБ) – важный показатель, характеризующий качество работы стиральной машины. Понять, насколько быстро белье потеряет свои изначальные свойства, можно при помощи расчета величины потери прочности. Производительность (ПР) рассчитывается либо за счет вычисления, сколько килограммов белья можно постирать за один час, либо за счет расчета времени, необходимого для стирки одного килограмма белья. Потребительские свойства для категории надежность (Н) можно выразить при помощи следующей модели:

$$Н = F(ПД, РП, БО),$$

где ПД – показатели долговечности (характеризуется сроком службы), РП – ремонтопригодность. К показателям ремонтопригодности относятся среднее время ремонта, средняя стоимость ремонта или отношение средней стоимости ремонта к стоимости прибора. Безотказность (БО) характеризуется средним временем наработки на отказ либо наработкой до отказа. Наработка до отказа – средний показатель, характеризую-

щий среднее время работы стиральной машины до первого отказа. Рассчитывается данный показатель как среднее арифметическое значение работы до первого отказа в результате испытания всей партии.

Оценку потребительских свойств бытовой техники следует также производить с точки зрения эргономичности, которая определяется удобством пользования и управления стиральной машины, наличием дополнительных элементов комфортности и дополнительных функций. Оценка эргономичности складывается из следующих показателей: ДФ – наличие дополнительных функций, УЭ – показатели удобства эксплуатации, Г – показатели гигиеничности, БВ – безвредность. Таким образом, номенклатуру потребительских свойств категории эргономичность (ЭР) можно представить следующим выражением:

$$ЭР = F(ДФ, УЭ, Г, БВ).$$

Дополнительные функции (ДФ) добавляют комфортности в эксплуатации и могут выгодно выделять ту или иную стиральную машину, являясь ее визитной карточкой. Речь идет о таких функциях стиральной машины, как обработка паром (технологией *Steam System*, *Steam Care* – функция «Пар» и программа «Освежение»), система самодиагностики, система «Водопад» (поток воды во время стирки с разных сторон омывает белье, что снижает время цикла и улучшает качество стирки). Разработана технология специальных движений *6 Motion*, состоящая из 6 различных алгоритмов вращения барабана, максимально адаптированных к типам тканей и объему стираемого белья. Некоторыми производителями используется устройство автодозировки моющих средств (технология *Auto Dos*, *I-Dos*, функция *Twin Dos*). Применение производителями воздушно-пузырькового генератора (технология *Eco Bubble*, *Super Washing Performance*) приводит к тому, что мельчайшие пузырьки проникают между волокнами, «выбивают» грязь из белья и повышают качество стирки. В качестве антибактериальных и антивирусных средств используются свободные ионы серебра (функция *Nano Silver*) или озон.

Показатель удобства эксплуатации (УЭ) выражается наличием дополнительных элементов комфортности. К таким элементам можно отнести возможность регулировки температуры и скорости отжима, наличие шланга для залива и слива воды, автонамотка шнура.

Оценка гигиеничности (Г) характеризуется удобством очистки стиральной машины. На данный показатель влияет материал бака стиральной машины, материал кюветы и корпуса.

Показатель безвредности (БВ) рассчитывается по уровню звуковой мощности при стирке и отжиме.

Показатели экономических свойств (ЭК) стиральной машины представлены энергоэффективностью и стоимостью прибора:

$$ЭЭ = F(РВ, ПЭ, МВР, МВКР),$$

где ЭЭ – энергоэффективность, РВ – расход воды, ПЭ – потребление энергии, МВР – мощность во включенном режиме, МВКР – мощность в выключенном режиме.

Количество потребляемой энергии и воды напрямую зависит от вместимости стиральной машины. Стоимость рассчитывается исходя из эксплуатационных характеристик и наличия дополнительных функций. При выборе товара покупатель руководствуется размером прибора, номинальной загрузкой, классом энергопотребления, видом управления, частотой вращения центрифуги (количество оборотов) и наличием дополнительных функций (защита от детей, защита от протечек, система «водопад»).

Под эстетическими свойствами (ЭС) в основном подразумевается внешний вид прибора (форма, материал изготовления корпуса, внешний дизайн). Данный параметр не регулируется нормативной документацией и может быть оценен покупателями на балльной основе.

Показатели безопасности (Б) складываются из двух составляющих:

$$Б = F(МБ, ЭБ),$$

где Б – безопасность, МБ – механическая безопасность. Электрическая безопасность (ЭБ) – проверка соответствия классу защиты от поражения электрическим током, защиты от доступа к токоведущим частям, соответствие стандартам потребляемой мощности, потребляемого тока, измерение тока утечки и электрической прочности. Производитель должен обеспечивать полную безопасность потребителя в соответствии с ГОСТ IEC 60335-1-2015 [5].

В результате анализа нормативной документации разработан реестр потребительских свойств для оценки качества стиральной машины, представленный в табл. 2.

Разработанный реестр потребительских свойств используется в форме чек-листа. При проектировании новой стиральной машины оценка качества производится во время утверждения конечного дизайна, а также при апробации продукции. Также оценка качества продукта согласно чек-листу производится во

Таблица 2

Реестр потребительских свойств оценки качества стиральной машины

ПС	Наименование свойства	Показатель свойства	Единица измерения	Регламент
Функциональность	Эффективность стирки	Отстирываемость белья	%	ГОСТ Р 56478-2015
	Качество полоскания белья	Количество стирального раствора, оставшегося в белье после полоскания	мл/кг сухого белья	ГОСТ Р МЭК 60456-2011
	Эффективность отжима белья	Остаточная влажность белья после отжима	%	ГОСТ Р 55008-2012
	Износ белья при стирке	Потеря прочности	%	ГОСТ 8051-83
	Производительность	Показатель производительности машин	кг сухого белья/ч; время на 1 кг белья	не регулируется стандартом
Безопасность	Электробезопасность	Защита от доступа к токоведущим частям	Доступны, не доступны	ГОСТ IEC 60335-1-2015 Бытовые и аналогичные электрические приборы. Безопасность. Часть 1. Общие требования
		Потребляемая мощность	Вт	
		Потребляемый ток	А	
		Нагрев	К	
		Ток утечки	мА	
		Электрическая прочность изоляции	В/мм	
	Механическая безопасность	Наличие тормозящих, блокировочных устройств быстровращающихся элементов конструкции машины (отдельно встроенных центрифуг, стиральных барабанов)	Есть, нет	ГОСТ IEC 60335-2-7-2014 Бытовые и аналогичные электрические приборы. Часть 2–7. Частные требования к стиральным машинам
		Время торможения (до остановки) быстровращающихся элементов конструкции машин после срабатывания отключающих и блокирующих устройств	мин	
Надежность	Долговечность	Интенсивность отказов	(отк/год)	не регулируется стандартом
		Средний срок службы изделия	кол-во лет	ГОСТ 8051-83
	Безотказность	Среднее время работы стиральной машины между параллельными отказами (время наработки на отказ)	ч	не регулируется
		Среднее время работы стиральной машины до первого отказа (время наработки до отказа)	ч	не регулируется
	Ремонтопригодность	Средняя стоимость ремонта	руб.	не регулируется
		Средняя стоимость ремонта к стоимости прибора	руб.	не регулируется
		Среднее время ремонта	ч	не регулируется
Эргономичность	Удобство эксплуатации	Наличие автонамотки шнура	Есть, нет	не регулируется
		Функция регулировки температуры и скорости отжима	Есть, нет	не регулируется
		Наличие световой индикации режимов работы	Есть, нет	не регулируется
		Наличие шланга для залива воды	Есть, нет	не регулируется
		Наличие насоса для слива воды	Есть, нет	не регулируется
	Наличие дополнительных функций	Наличие системы *Nano Silver*	Есть, нет	не регулируется
		Сотовый барабан стиральной машины	Есть, нет	не регулируется
		Барабаны *VarioSoft*	Есть, нет	не регулируется
		Программа «Антиаллергия»	Есть, нет	не регулируется
		Программа «Интенсивное замачивание» (*Bubble Soak*)	Есть, нет	не регулируется
		Stain Removal (удаление 16 видов пятен)	Есть, нет	не регулируется

Окончание табл. 2

ПС	Наименование свойства	Показатель свойства	Единица измерения	Регламент
Эргономичность	Наличие дополнительных функций	Программа «Антиаллергия»	Есть, нет	не регулируется
		Программа «Интенсивное замачивание» (*Bubble Soak*)	Есть, нет	не регулируется
		Stain Removal (удаление 16 видов пятен)	Есть, нет	не регулируется
		Технология *Steam System* (обработка паром в виде 3 техник)	Есть, нет	не регулируется
		Технология *Steam Care* (функция «Пар» и программа «Освежение»)	Есть, нет	не регулируется
		Технология *True Steam* (стирка с паровым воздействием)	Есть, нет	не регулируется
		Функция обработки паром	Есть, нет	не регулируется
		Система самодиагностики	Есть, нет	не регулируется
		Функция *I-Dos*	Есть, нет	не регулируется
		Контроль степени загрузки	Есть, нет	не регулируется
		Технология специальных движений «*6 Motion*»	Есть, нет	не регулируется
		Система контроля пены	Есть, нет	не регулируется
		Технология *Twin Dos*	Есть, нет	не регулируется
		Устройство автодозировки моющих средств *Auto Dos*	Есть, нет	не регулируется
		Функция *Speed Perfect*	Есть, нет	не регулируется
		Функция *Time Manager*	Есть, нет	не регулируется
		Технология *Eco Bubble*	Есть, нет	не регулируется
		Технология *Super Washing Performance*	Есть, нет	не регулируется
		Наличие фильтра для улавливания ворсинок	Есть, нет	не регулируется
		Наличие системы «Водопад»	Есть, нет	не регулируется
		Функция сушки	Есть, нет	не регулируется
		Функция «Отложенный старт»	Есть, нет	не регулируется
		Функция «Ночная стирка»	Есть, нет	не регулируется
		Программа «Быстрая стирка»	Есть, нет	не регулируется
		Программа «Стирка шерсти»	Есть, нет	не регулируется
		Инверторный двигатель	Есть, нет	не регулируется
	Показатели гигиеничности (удобство чистки)	Материал бака стиральной машины	Балл	не регулируется
		Материал кюветы	Балл	не регулируется
		Материал корпуса	Балл	не регулируется
	Безвредность	Корректированный уровень звуковой мощности при отжиме	дБ	ГОСТ Р 56478-2015
		Распространяемые по воздуху акустические шумы во время стирки	дБ	ГОСТ Р 56478-2015
Эстетические свойства	Внешний вид	Отсутствие визуальных дефектов	Балл	не регулируется
		Внешний дизайн	Балл	не регулируется
Экономические свойства	Энергоэффективность	Удельный расход воды	л/кг	ГОСТ Р 56478-2015
		Мощность в режиме «включено»	кВт/ч	ГОСТ Р 56478-2015
		Мощность в режиме «выключено»	кВт/ч	ГОСТ Р 56478-2015
		Потребление энергии	кВт/цикл	ГОСТ Р 56478-2015
	Стоимость	Розничная цена	руб.	не регулируется

время тестирования в условиях серийного производства. Применение разработанного реестра также является инструментом для системы поддержки принятия решений при производстве и оценке качества инновационной продукции [6].

В ходе внедрения разработанного реестра в качестве чек-листа на производственном предприятии было выявлено, что часть потребительских свойств не учитывается и не оценивается производителем. В связи с этим были добавлены проверки в план тестирования приборов, что позволило отслеживать, корректировать и улучшать показатели, которые до этого не контролировались.

Внедрение методики с июня 2017 года по март 2018 привело к тому, что внешний показатель качества стиральных машин (уровень технических отказов (TCR)) улучшился на 6% за счет снижения количества жалоб потребителей. В связи с этим затраты на гарантийные ремонты снизились на 8%.

Библиографический список

1. *Болотова, С. С.* Потребительские свойства современных стиральных машин // IV Омские торгово-экономические чтения. Омск. 2007.
2. *Сизова, Л. А.* Новое поколение автоматических стиральных машин // Бытовая электротехника, экспресс-информация. Вып. 11(17). М., 1988.
3. ГОСТ Р МЭК 60456-2011. Методы измерения функциональных характеристик. М.: Изд-во стандартов, 2013. 16 с.
4. ГОСТ Р 56478-2015. Энергетическая эффективность. Машины стиральные и аналогичные. М.: Изд-во стандартов, 2016. 20 с.
5. ГОСТ IEC 60335-1-2015. Бытовые и аналогичные приборы. М.: Изд-во стандартов, 2017. 18 с.
6. *Семенова, Е. Г.* Система поддержки принятия решения в многокритериальных задачах управления производством инновационной продукции / Е. Г. Семенова, М. С. Смирнова // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2008. № 56. С. 57–59.

УДК 519.254

В. А. Тушавин*
кандидат технических наук, кандидат экономических наук
М. С. Смирнова*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ РАНЖИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРИ РЕШЕНИИ КВАЛИМЕТРИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

В статье рассматривается численный эксперимент по нахождению наиболее рационального алгоритма ранжирования с точки зрения скорости расчета и точности результата. В результате проведенного численного эксперимента выявлено преимущество метода Шульце перед другими рассмотренными в статье алгоритмами при решении квалиметрических задач.

***Ключевые слова**: медиана Кемени, метод Шульце, ранжирование, статистика.*

V. A. Tushavin*
PhD. Tech., PhD. Economic
M. S. Smirnova*
PhD. Tech., Associate Professor
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

COMPARISON THE METHODS OF OBJECTS RANKING WHILE SOLVING QUALIMETRIC TASKS

Abstract: The article considers the numerical experiment on finding the most rational ranking algorithm from the point of view of the calculation speed and accuracy of the result. As a result of the numerical experiment, the advantage of the Schulze method is revealed before the algorithms for Kemeny–Young method when solving qualimetric problems.

***Keywords:** Kemeny, Schulze, rankings, statistics.*

Задача ранжирования различных объектов является достаточно распространенной как в квалиметрии, так и теории принятия решений. К настоящему моменту она исследована достаточно полно. Следует отметить, что анализ Национальной электронной библиотеки показал, что в российской квалиметрии наибольшее количество публикаций связано с так называемой медианой Кемени.

Как показал проведенный обзор научной литературы, основными методами получения результирующих рангов являются либо эвристический алгоритм, предложенный Б. Г. Литваком [1, с. 82–88], либо сведение нахождения медианы к задаче линейного программирования на векторах предпочтений [1, с. 88–89]. Среди современных зарубежных исследований наиболее полно этот вопрос рассмотрен и исследован в работе [2] и соответствующем пакете расширения для *R ConsRank* [3]. Отдельно следует отметить метод ветвей и границ, рассмотренный в статье в *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* [4].

В предыдущих исследованиях [5] был реализован и протестирован алгоритм нахождения медианы Кемени путем решения соответствующей задачи линейного программирования. Также в той работе был реализован метод Шульце на основе алгоритма Флойда – Уоршелла, показавший высокую эффективность [6]. В данной статье рассматривается результат работы различных алгоритмов ранжирования и делается вывод об их эффективности.

Предположим, что имеется стохастическая ранговая матрица $\|a_{ij}\|_{n\times m}$, где n – количество экспертов, а m – количество объектов, подлежащих ранжированию. Также допустим, что все строки матрицы изначально совпадают меж-

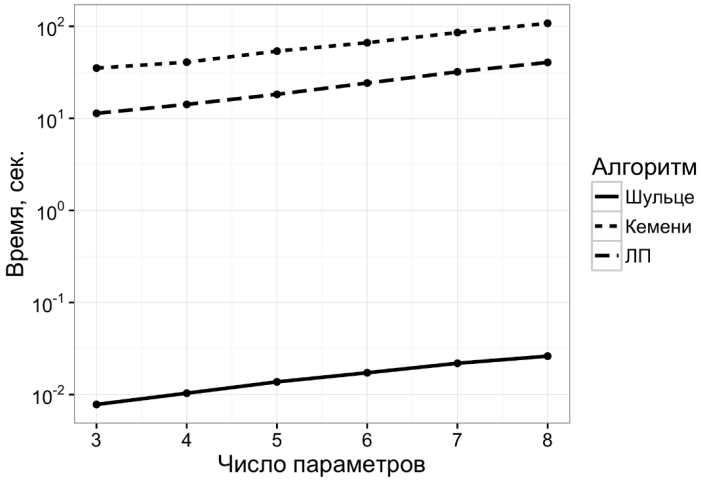


Рис. 1. Кумулятивное время нахождения итогового ранжирования для 4800 тестов

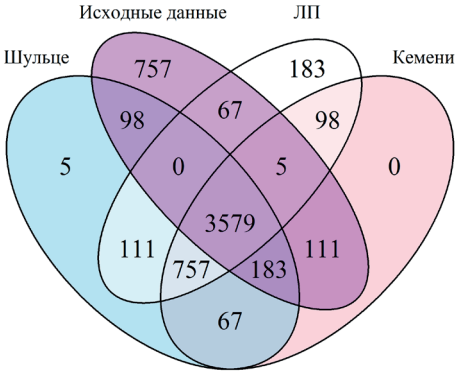


Рис. 2. Пересечение множеств найденных ранжирований с исходными данными

ду собой и содержат значения от 1 до m, где 1 – наиболее предпочтительный объект. Теперь осуществим случайную перестановку рангов двух объектов во всех строках, начиная со второй, имитируя таким образом некое расхождение взглядов экспертов. Первую строку матрицы менять не будем для снижения вероятности возникновения парадокса Кондорсе. Таким образом, численный эксперимент выглядит следующим образом:

– число ранжируемых объектов $m \in \{3...8\}$;

– число экспертов $n \in \{4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512\}$;

– число тестов для каждой пары (n, m) =100;

– общее число тестов 4800.

Задача эксперимента: выявить способность алгоритмов восстанавливать первоначально заданное ранжирование.

В результате эксперимента установлено, что наиболее быстрым является алгоритм Флойда – Уоршелла (на три порядка быстрее остальных) (см. рис. 1).

На рис. 2 показана диаграмма, изображающая пересечения множеств решений данными алгоритмами. Как следует из рис. 2, имеются определенные расхождения в полученных результатах, а наименее точным оказывается нахождение медианы Кемени методом линейного программирования. Точность нахождения первоначального ранжирования составила (в скобках указан 95%-ный доверительный интервал, отсортировано в порядке улучшения результата):

– линейное программирование (R) [5, 6]: 0.76 (0.75; 0.77);

– Флойда – Уоршелла (Шульце) (C++) [6]: 0.80 (0.79, 0.82);

– *QuickCons* (R) [3]: 0.81 (0.80, 0.82).

Как показал анализ эксперимента, наибольшая точность достигается при числе ранжируемых показателей больше трех и числе оценок более 12. На рис. 3 представлены результаты проведенного эксперимента для данной страты.

Точность нахождения первоначальной последовательности:

– линейное программирование (R) [5, 6]: 0.99 (0.98, 0.99);

– Шульце (C++) [6]: 0.99 (0.99, 0.99);

– *QuickCons* (*ConsRank*) [3]: 0.99 (0.99; 0.99).

Следует отметить, что в процессе исследования также был реализован на C++ эвристический алгоритм, предложенный Литваком [1], однако проверка его на тестовых примерах показала, что он достаточно часто дает неоптималь-

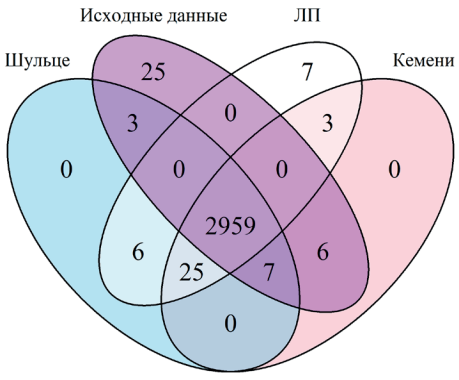


Рис. 3. Пересечение множеств выборки из найденных ранжирований для числа показателей больше трех и числе оценок более 12

ные решения и может быть использован для решения крайне ограниченного круга задач.

Исходя из изложенного можно сделать вывод, что, поскольку при сопоставимой точности скорость нахождения результирующего ранга у метода Шульце быстрее на три порядка, данный алгоритм следует предпочесть для решения практических задач.

Библиографический список

1. *Литвак, Б. Г.* Экспертная информация: Методы получения и анализа. М.: Радио и связь, 1982. 184 с.
2. *Amodioa, S.* Accurate algorithms for identifying the median ranking when dealing with weak and partial rankings under the Kemeny axiomatic approach / S. Amodioa, A. D'Ambrosio, R. Sicilianob // European Journal of Operational Research. 2016. Vol. 249. Iss. 2. P. 667–676.
3. *D'Ambrosio, A.* ConsRank: Compute the Median Ranking(s) According to the Kemeny's Axiomatic Approach [R package version 1.0.2] / A. D'Ambrosio, S. Amodio. 2015. URL: http://CRAN.R-project.org/package=ConsRank.
4. *Emond, E.* A new rank correlation coefficient with application to the consensus ranking problem / E. Emond, D. Mason // Journal of Multi-Criteria Decision Analysis. 2002. N 11(1). P. 17–28.
5. *Conitzer, V.* Improved Bounds for Computing Kemeny Rankings / V. Conitzer, A. Davenport, J. Kalagnanam // AAAI'06: Proceedings of the 21st National Conference on Artificial Intelligence. 2006. Vol. 1. P. 620–626.
6. *Тушавин, В.* К вопросу о сравнении эффективности алгоритмов ранжирования // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». 2016. № 1. С. 67–70.
7. *Орлов, А. И.* Законы больших чисел и состоятельность статистических оценок в пространствах произвольной природы / А. И. Орлов, В. Н. Жихарев // Статистические методы оценивания и проверки гипотез. Межвузовский сборник научных трудов. Пермь: Изд-во Пермского государственного университета, 1998. С. 65–84.
8. *Walker, S. H.* Estimation of the probability of an event as a function of several independent variables / S. H. Walker, D. B. Duncan // Biometrika. 1967. Vol. 54. N 1/2 (Jun., 1967). P. 167–179.
9. Classification and Regression Trees (Wadsworth Statistics/Probability) / L. Breiman, J. Friedman, C. J. Stone, R. A. Olshen. Chapman and Hall/CRC. 368 p.
10. *Therneau, T.* rpart: Recursive Partitioning and Regression Trees [R package version 4.1-10] / T. Therneau, B. Atkinson, B. Ripley. 2015. URL: http://CRAN.R-project.org/package=rpart.

УДК 338.2

Н. В. Андросенко
кандидат экономических наук
ФБУ «Тест-С.-Петербург»
А. Ю. Янченко
кандидат экономических наук, доцент
ФБУ «Тест-С.-Петербург»

АСПЕКТЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ В КОНТЕКСТЕ ОСОБЕННОСТЕЙ УПРАВЛЕНИЯ

Статья посвящена основным принципам управления устойчивым развитием предприятия. Анализируется эволюция понятия «устойчивое развитие предприятия». Предприятие рассматривается с точки зрения микроуровня глобальной социально-экономической системы.

***Ключевые слова**: устойчивое развитие, социально-экономическая система, управление предприятием, экономические показатели, окружающая среда.*

N. V. Androsenko
PhD. Economic
FBI "Test-S.-Petersburg"
A. Y. Yanchenko
PhD. Economic, Associate Professor
FBI "Test-S.-Petersburg"

ASPECTS OF SUSTAINABLE ENTERPRISE DEVELOPMENT IN THE CONTEXT OF SPECIFICITIES OF MANAGEMENT

The article is devoted to the basic principles of sustainable development management. The evolution of the concept of "sustainable development of the enterprise" is analyzed. The enterprise is considered from the point of view of a microlevel of global social and economic system.

***Keywords:** sustainable development, socio-economic system, enterprise management, economic indicators, environment.*

Устойчивое развитие подразумевает процесс экономических изменений с оптимальным использованием ограниченных ресурсов и сохранением стабильности социальных систем и окружающей среды.

Концепция устойчивого развития социально-экономических систем может быть реализована на микро-, мезо- и макроуровнях. Теоретические принципы устойчивого развития применимы для таких социально-экономических систем, как страна, город, территория, административно-территориальное образование, а также предприятие. На микроуровне рассматриваются именно предприятия, поскольку предприятие также представляет собой открытую социально-экономическую систему. Однако общепринятого определения устойчивого развития предприятия не существует.

Тем не менее многие авторы в своих публикациях, например, З. В. Коробкова [1], Э. М. Коротков [2], Д. Ковалев и Т. Сухорукова [3] вполне логично трактуют устойчивое развитие предприятия как его экономическое развитие под влиянием определенных факторов. Характеризуется данное развитие экономическими показателями, такими как платежеспособность, прибыльность, конкурентоспособность продукции, гибкость технико-технологической базы, организационно-экономическая гибкость, инвестиционная и инновационная активность, финансовая устойчивость, воспроизводственная целостность (комплексность). Об этом пишут в своих

работах З. М. Батымурзаева [4], Е. И. Степук [5], Т. М. Конопляник [6].

Положительная динамика представленных показателей обеспечивает гибкость и быстроту реакции на изменение внешних экономических условий и конъюнктуры рынка, высокую конкурентоспособность продукции, высокую инвестиционную активность, ликвидность и финансовую стабильность, развитие инноваций.

Необходимо отметить, что среди экономических показателей особое влияние на устойчивое развитие имеет воспроизводственная целостность предприятия. При этом нельзя забывать об экологической составляющей устойчивого развития. Предприятие своей деятельностью не должно причинять вред окружающей среде. Приоритетом в деятельности должно быть бережное и осмысленное использование ресурсов. Социальная ответственность также важна, нельзя забывать и об интересах будущих поколений.

С этой точки зрения более прогрессивным представляется подход А. Г. Корякова [7]. В его работе проводится анализ факторов, действующих на предприятие, и возможности измерения данных факторов. Рассматриваются такие факторы, как количество выбросов в атмосферу, численность занятого населения, объемы используемых ресурсов, расходы на новую технику, стоимость привлеченного капитала, технологии, включая передовые бизнес-технологии, стоимость информационных систем и программного обеспечения.

На основе этих факторов предлагается система показателей эффективности развития, которая включает показатели производительности труда, ресурсоемкости продукции, эффективности производства, капиталоотдачи, скорости внедрения инноваций на базе информационных систем, динамики загрязнения окружающей среды. При этом человеческий фактор в устойчивом развитии предприятия характеризуется через показатели, учитывающие инновации и менеджмент в его деятельности.

Данная система, характеризующая развитие предприятия, является более продвинутой и современной по сравнению с простыми экономическими системами. В ней учитывается вторая составляющая устойчивого развития – экологическая. Однако небольшой недостаток в данной системе все же проявляется в отсутствии должного внимания к социальной составляющей. Между тем в современной экономике именно инвестиции в человеческий капитал являются приоритетными.

В текущей экономической ситуации меняются направления финансовых потоков, меняется понимание содержания ключевых понятий. Около двухсот лет назад капиталом считалась земля, сто лет назад – фабрики и заводы. Сегодня капиталом считается информация. В настоящее время главным источником богатства, главным ресурсом становятся знания. Интеллектуальные фонды в современных экономических условиях замещают основные фонды, то есть здания, сооружения, станки, оборудование и т. п. Из материальной экономика трансформируется в нематериальную.

Затраты на информацию и научные исследования теперь в значительной степени содержатся в стоимости многих товаров, вытесняя затраты на материалы, сырье, станки и т. п. Можно считать, что в новой экономике продают и покупают в основном актуализированные знания, поэтому современную экономику все чаще называют экономикой знаний.

Интенсивное развитие предприятия возможно только при условии использования инновационных идей и активного внедрения их в продукт массового производства. Для этого требуются квалифицированные специалисты. Их нехватка представляет большую проблему для отечественных предприятий.

В. М. Рябов [8] считает, что реакция на внешние воздействия является главной характеристикой устойчивого развития предприятия. Им предложена система оценки, в которой показатели поделены на три категории – входного воздействия, состояния и управления. Показатели из первой категории определяют человеческую деятельность, процессы и характеристики, которые влияют на устойчивое развитие. Текущее состояние различных аспектов устойчивого развития характеризуют показатели второй категории. Индикаторы реагирования, позволяющие осуществлять политический выбор или какой-либо другой способ реагирования для изменения текущего состояния, – это третья категория.

Оценка эффективности устойчивого развития предприятия осуществляется через такие показатели, как достижение устойчивых темпов экономического роста основного вида деятельности предприятия, получение прибыли, достаточной для самофинансирования экономического развития, и обеспечение ее роста в динамике. Внимание акцентируется еще и на том, что для полной оценки степени устойчивого развития предприятия недостаточно только количественных оценок, нужны также и качественные.

Другой автор, К. Р. Гришаков [9], утверждает, что устойчивое развитие предприятия обе-

спечивается его инновационной активностью, поскольку важна не только способность к устойчивому развитию, но и возможность ее реализовать. В его работе гибкость, инновационная восприимчивость, заинтересованность в результатах инновационной деятельности, непрерывность инноваций выделяются в качестве основных принципов устойчивого развития предприятия.

Принимая во внимание все разнообразие трактовок, присутствующее у разных авторов, и учитывая сущность современного подхода, рассматривающего предприятие как микроуровень общей социально-экономической системы, мы делаем вывод, что существует необходимость в обобщенном универсальном определении понятия «устойчивое развитие предприятия».

Рассмотрим отдельно понятие «устойчивость». В Советском энциклопедическом словаре [10] устойчивость определяется как междисциплинарная категория, которая применяется в различных науках. Само же слово «устойчивость» образовано от слова «устой», что означает «прочно укоренившаяся традиция, основополагающее начало, основа чего-либо». В свою очередь В. А. Долятовский и В. Н. Долятовская [11] говорят о том, что устойчивость – свойство объекта, заключающееся в способности сохранять достаточно малые отклонения процесса после действия возмущения. Устойчивость системы заключается в способности выполнять свои функции и сохранять свои свойства после возмущающего воздействия.

Разберем теперь понятие «развитие». В соответствии с Философским энциклопедическим словарем [12] развитие – это необратимое, направленное, закономерное изменение материальных и идеальных объектов. В Философской энциклопедии [13] подчеркивается, что прогрессивное развитие – это переход от одного качественного состояния к другому, от старого к новому. Таким образом, устойчивое развитие предполагает инновационный характер. Собственно устойчивое развитие основывается на прогрессивных изменениях, то есть на инновациях.

С другой стороны, инновации можно трактовать как реакцию на внешние воздействия. Для предприятия таковыми являются изменения спроса, законодательства, появление новых рынков и т. д. По своей сути устойчивое развитие предприятия – это прогрессивные изменения под влиянием внешних факторов.

Предприятие не может рассматриваться изолированно, так как представляет социально-экономическую систему на микроуровне. Резюмируя, можно сказать, что устойчивое развитие предприятия возможно лишь при условии, что цели его развития совпадают с общими целями развития региона, где оно расположено, в том числе его производственная деятельность удовлетворяет потребностям территориальной социально-экономической системы.

Следовательно, принципы устойчивого развития должны быть учтены в программах развития предприятий по аналогии с концепциями развития страны, территории, региона [14]. Достижение устойчивости становится желательнее, чем просто достижение определенных экономических показателей в результате развития деятельности. Ориентация только на темпы и объемы роста валового внутреннего продукта не является приоритетом согласно принципам устойчивого развития. Максимизация прибыли объективно уже не может больше рассматриваться как основная движущая сила развития.

Кроме учета экономического фактора, развитие должно осуществляться с обязательным учетом социального и экологического факторов. Это касается как развития социально-экономической системы в целом, так и развития отдельных предприятий, потому что уже на микроуровне идет формирование потенциала развития экономики всей системы.

Можно резюмировать, что устойчивое развитие предприятия – это прогрессивные изменения, возникающие под влиянием внешних факторов и способствующие росту объемов производства, снижению воздействия на окружающую среду, улучшению ресурсосбережения и осуществлению социальных гарантий.

Обратимся к процессу управления этими изменениями. Как указывает Ю. К. Машунин [15], внутри промышленного предприятия можно выделить два вида деятельности – собственно производство, то есть переработка поступающих ресурсов в товары или услуги, и управление, то есть контроль и руководство деятельностью. Следовательно, генерация и реализация изменений – это задача управления, где объект управления – само производство, а также его обеспечение ресурсами и реализация продукции или услуг, а субъект управления – работники предприятия, выполняющие функции управления: прогнозирование, планирование, принятие решений, учет, контроль, анализ и регулирование.

Устойчиво работающее предприятие, как утверждает К. В. Григорьева [16], может также характеризоваться соотношением потоков. На входе системы – потоки входящей энергии, на выходе – потоки преобразованной энергии. Система преобразует энергию с использовани-

ем ресурсов и с потерей части энергии. Упрощая эту модель и применяя ее к предприятию, получим, что на входе имеется поток ресурсов Р, а на выходе – поток продукции П. Естественно, эти потоки зависят от времени, и, кроме того, поток продукции зависит от потока ресурсов Р.

К. В. Григорьева указывает, что устойчивое развитие – это сохранение развития в длительной перспективе в условиях негативных внутренних и внешних воздействий за счет неубывающего темпа роста эффективности использования полной мощности, повышения уровня жизни и качества окружающей среды при неувеличении темпов роста полной мощности.

Таким образом, колебания потока ресурсов не вызывают колебаний потока продукции, если предприятие находится в процессе устойчивого развития. Получается, что суммарный поток продукции прямо пропорционален времени и всегда превышает суммарный поток ресурсов, что можно представить формулой

$$\Sigma П = f(kt), \Sigma П > \Sigma Р.$$

Производство продукции направлено на удовлетворение существующих потребностей общества. В конкурентной борьбе побеждает тот, кто первым выполнит поставленную задачу. Деятельность предприятия также не может не оказывать влияния на окружающую среду, в которой происходят изменения, не обязательно положительного характера. Подобные изменения влекут за собой изменение потребностей и возникновение новых задач перед руководством предприятия.

Таким образом, процесс устойчивого развития на самом предприятии можно представить как схему (рис. 1).

По мнению К. В. Григорьевой, изменения происходят тогда, когда субъект управления осуществляет управляющее воздействие над объектом управления. Это управляющее воздействие основано на информации, полученной от службы менеджмента предприятия, главной задачей которой является постоянный анализ рынка и определение новых потребностей, то есть активное взаимодействие с внешней средой.

Необходимо отметить определенную эволюцию понятия «устойчивое развитие предприятия». Сначала устойчивым считалось то предприятие, которое имело стабильную прибыль, поэтому главенствовали собственнические интересы. Все бизнес-процессы на предприятии были ориентированы на обеспечение стабильного спроса на продукцию предприятия.

В эпоху домашинного производства устойчивость предприятий и обеспечение спроса достигались путем личной рекламы самого предпринимателя, ремесленника или торговца, а не за счет совершенствования технологического процесса. Появление первых машин привело к удешевлению производства, а следовательно, и к увеличению объемов выпуска продукции.

Первая научно-техническая революция в конце XIX – начале XX веков способствова-

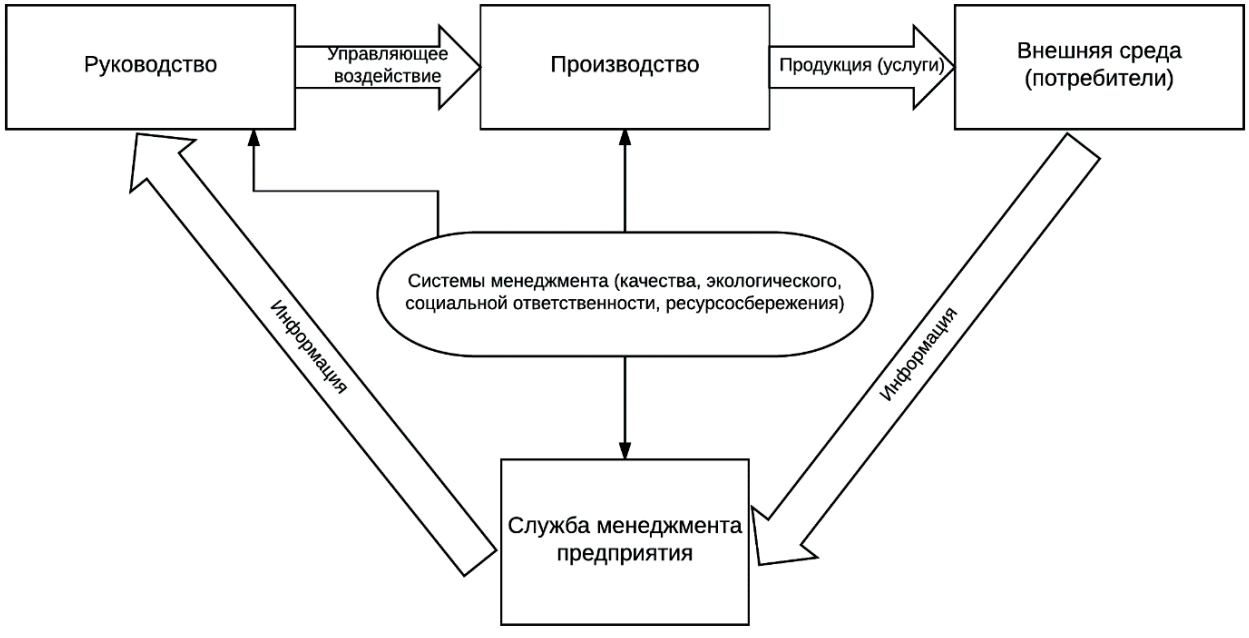


Рис. 1. Обобщенная схема процесса устойчивого развития предприятия

ла развитию промышленности. Самым прогрессивным видом стало конвейерное производство, которое позволило резко нарастить темпы выпуска товаров. В этот период понятие «устойчивое развитие предприятия» рассматривалось как способность производить больше продукции по низкой цене. При этом качеству товаров уделялось совсем мало внимания. Реакция на это в условиях рыночной экономики проявилась достаточно быстро. Устойчивый спрос смогли обеспечить себе только те предприятия, которые повышали качество товаров.

Понятие «устойчивое развитие» трансформировалось и в плановой экономике. Специфика работы предприятий в это время заключалась в отсутствии конкуренции. Предприятия, как правило, не выбирали поставщиков и потребителей, не формулировали миссию. Превалировала узкая специализация. В соответствии с таким подходом понятие «устойчивое развитие» сводилось к выполнению плановых заданий.

В конце 1950-х – начале 1960-х годов наметился отход от плановой экономики, в Советском Союзе появились элементы рынка – так называемый хозрасчет. Постепенно предприятие трансформировалось в сложную систему, задача которой состояла не только в производстве материальных ценностей, но и в удовлетворении социальных запросов персонала, что нашло отражение в планах социально-экономического развития. Под влиянием общественных движений в этих планах появилась и экологическая составляющая.

В условиях рыночной экономики многие предприятия столкнулись с конкуренцией, в частности с импортной продукцией, что заставило их переменить свои ориентиры. Возникла насущная необходимость увеличивать сбыт продукции, что оказалось возможным только при улучшении ее качества. Тогда же появилось понимание того, что устойчивое развитие невозможно без управления качеством и внедрения систем менеджмента качества.

В работах К. Ф. Механцевой, О. К. Карповой и А. А. Юркова [17] указывается на ориентацию современной экономики на знания и интеллектуальные технологии, на значительное сокращение жизненного цикла товара, смещение акцента от производства к оказанию услуг. Массовое производство больше не превалирует. Изменившиеся условия приводят к необходимости перестройки процесса развития. В рамках современных тенденций важно не только достижение определенных экономических показателей, но и обеспечение экономической стабильности или устойчивости в целом.

Современные условия хозяйствования характеризуются, с одной стороны, упрощением отдельных бизнес-процессов в связи с их автоматизацией, а с другой – усложнением общего порядка осуществления деятельности. Возникает необходимость учета определенных рекомендаций. Для этого разрабатываются специальные стандарты, способствующие управлению аспектами устойчивого развития и улучшению деятельности предприятий.

Рассмотрим подробнее особенности существующего порядка ведения бизнеса.

1. Добровольный характер требований стандартов.

В плановой экономике требования стандартов носили обязательный характер, сфера государственного регулирования качества составляла порядка 85%.

В рыночной экономике применение стандартов носит добровольный характер. Выполнение принятых добровольно обязательств, в том числе требований стандартов, – это распространенная практика экономически развитых зарубежных стран. Если в контракте имеются ссылки на стандарты на продукцию, производственные процессы, требования к системе менеджмента качества, то они становятся обязательными в силу договорно-правовых отношений субъектов права.

Принцип добровольного применения и обязательного исполнения документов по стандартизации обладает свойствами универсальности, гибкости и адаптивности.

2. Единство и противоположность интересов потребителя, государства и бизнеса.

Потребитель заинтересован получить пригодную к применению и надежную продукцию по соответствующей характеристикам изделия цене и в обещанный поставщиком срок, а также качественный и своевременный технический сервис. Государство ожидает от производителей минимального загрязнения окружающей среды, экономии ресурсов и решения социальных вопросов. Производитель же заинтересован в проникновении на рынок или в расширении доли рынка и объемов продаж, в получении достаточной прибыли, а также в повышении производительности за счет устранения недостатков в процессах и снижения уровня дефектности. Не менее важно для производителя уменьшение риска потерь в период гарантийного обслуживания и при возмещении ущерба за дефектную продукцию.

Можно заметить противопоставление интересов. Потребители хотят получить качественную продукцию по минимальной цене. Произ-

водители стремятся получить максимальный доход, увеличивая цену и сокращая издержки, не особенно заботясь об охране окружающей среды. Государство же должно обеспечить высокое качество жизни своих граждан, в том числе и за счет улучшения экологической обстановки.

Тем не менее указанные стороны объединяет качество, в повышении которого заинтересованы все. Потребитель – поскольку повышение качества означает повышение степени удовлетворения его потребностей, государство – поскольку повышение качества приводит к уменьшению воздействия на окружающую среду, к экономии ресурсов, повышению социальной ответственности бизнеса. Производитель заинтересован в повышении качества, поскольку это означает расширение его присутствия на рынке, появление новых потребителей его продукции, уменьшение издержек и улучшение взаимоотношений с государством.

Таким образом, качество как объединяющий момент может быть взято за основу в разработке программ развития.

3. Факторы повышения качества.

Увеличение конкурентоспособности является одной из главных задач предпринимателя в современной рыночной экономике. Конкурентоспособность продукции предполагает высокий и стабильный спрос, который может обеспечить только качественная продукция, соответствующая запросам потребителей.

Наряду с конкурентоспособностью важнейшим фактором для повышения качества продукции является законодательство, например, закон «О защите прав потребителей» призван оградить рынок от фальсификата и недоброкачественной продукции.

4. Процесс глобализации.

Глобализация охватывает все новые страны и кооперационные связи предприятий вне зависимости от требований законодательства и традиций производства. Глобализация – неотъемлемая черта современного мира, которую нельзя не принимать во внимание.

Результатом текущих преобразований является процесс сближения потребительских предпочтений и универсализация ассортимента предлагаемых товаров по всему миру на основе стандартизации. Предлагая потребителю большую свободу выбора, глобализация неизбежно ведет к обострению конкуренции.

Нельзя не учитывать и отрицательные последствия глобализации, которые связаны с вынужденной перестройкой структуры экономики некоторых стран, поскольку ряд отраслей из-за глобализации теряет свои конкурентные преимущества. Это приводит к существенным социальным проблемам, так как вызывает перераспределение рабочей силы. Кроме того, глобализация способствует урбанизации, оказывающей значительное воздействие на окружающую среду.

5. Изменение структуры и состава хозяйствующих субъектов.

Наличие малого бизнеса является отличительной чертой современной рыночной экономики России. При плановой экономике такого субъекта предпринимательской деятельности не существовало. Процесс создания в России малых предприятий начался в 1988 году, после выхода закона «О кооперации в СССР». Несмотря на такой длительный срок существования законодательного акта, малый бизнес в России до сих пор развивается неудовлетворительными темпами. Например, в странах Европейского союза малый бизнес составляет около 90% общего числа предприятий, а в России – порядка 30%.

В результате анализа всех перечисленных особенностей ведения бизнеса в современных условиях для управления устойчивым развитием предприятия можно сформировать классификацию целей устойчивого развития в соответствии со спецификой устойчивости (см. таблицу).

Таким образом, управление устойчивым развитием предприятия является сложной многокомпонентной задачей. Ее решение подразумевает в первую очередь устойчивую работу производственного комплекса (производственная устойчивость). Однако в современных условиях этого невозможно достичь без спроса на продукцию (рыночная устойчивость) и надежного финансового обеспечения (финансово-экономическая устойчивость). Этих видов устойчивости можно достичь лишь при грамотном высокоэффективном управлении (организационно-управленческой устойчивости) и постоянном внимании к повышению качества (инновационный рост).

На современном этапе хозяйственной деятельности возрастает роль человеческого фактора и экологической грамотности, поэтому устойчивое развитие предприятия обязательно должно включать достижение социальной устойчивости и защиту окружающей среды. Кроме того, неотъемлемой составляющей устойчивого развития предприятия должно быть ресурсосбережение.

Для достижения каждого вида устойчивости необходимо управление по целям устойчивого развития и решение определенных задач, которые не могут рассматриваться иначе как во взаимодействии и взаимовлиянии. Так, разработка

Таблица

Классификация целей устойчивого развития предприятия

№	Характеристика устойчивости	Цели устойчивого развития
1	Производственная устойчивость	эффективность использования ресурсов
		эффективность производственной деятельности
2	Рыночная устойчивость	расширение производства
		повышение конкурентоспособности
		расширение рынков сбыта
3	Финансово-экономическая устойчивость	эффективность финансово-хозяйственной деятельности
		улучшение платежеспособности
4	Организационно-экономическая устойчивость	эффективность управления
		повышение инвестиционной привлекательности
5	Инновационный рост	новые технологии
		новые методы производства
		новая продукция
6	Социальная сфера	охрана здоровья и безопасности труда
		обучение и профессиональная подготовка
7	Экология	защита окружающей среды
8	Ресурсосбережение	экономия ресурсов

и внедрение новой продукции способствует расширению рынков сбыта. А внедрение новых методов производства ведет не только к инновационному росту, но и к организационно-управленческой устойчивости.

Все перечисленные особенности предполагают изменение подхода к управлению предприятием. Можно сделать вывод, что управление устойчивым развитием предприятия в современных экономических условиях характеризуется следующими отличительными особенностями (рис. 2).

Для подведения итогов рассмотрим подробнее указанные характеристики управления устойчивым развитием.

1. Системный подход.

Для обеспечения постоянного доверия потребителя предприятию необходимо поддержание положительного имиджа. Именно системно поддерживаемое внимание к составляющим устойчивого развития лежит в основе надежной деловой репутации. В этой связи планы развития предприятия, каждое стратегическое решение должны в обязательном порядке учитывать все составляющие устойчивого развития. Должны анализироваться и контролироваться все связанные с устойчивым развитием аспекты.

Рис. 2. Отличительные особенности управления устойчивым развитием предприятия

2. Применение риск-менеджмента.

В современных условиях применение риск-менеджмента снижает вероятность наступления чрезвычайных происшествий и тяжесть их последствий. Актуальность применения методики оценки и управления рисками сейчас необычайно высока, так как текущие условия хозяйствования отличаются возрастанием как динамики изменений, так и их непредсказуемостью.

3. Ориентация на индивидуальность потребителя.

Нарастание конкурентной борьбы заставляет предпринимателей искать новые, дополнительные факторы, способствующие успеху на рынке. Одним из таких факторов является ориентация на индивидуальность потребителя. Необходимо, чтобы потребитель получал именно тот товар или услугу, которые нужны именно ему, и по привлекательной цене.

4. Приоритетность качества в развитии.

Развитие научно-технического прогресса приводит к значительному усложнению продукции и технологии ее производства. Потребности человеческого общества постоянно растут. На все эти вызовы времени есть достойный ответ – повышение качества продукции и услуг. При этом обеспечение качества должно стать делом каждого сотрудника предприятия вне зависимости от выполняемых им функций.

5. Учет человеческого фактора.

В современном глобальном мире производство может быть налажено в любом месте, однако успех производства обеспечивается за счет применения прогрессивных технологий и международных стандартов, которые разрабатываются главным образом в развитых странах. Во многом экономический успех этих стран обеспечен именно продажей технологий. А поскольку разработка новых технологий целиком зависит от квалификации персонала, то на первое место выходит человеческий потенциал. Внимание к человеческому фактору и обеспечивает поддержание устойчивого развития.

6. Необходимость постоянных изменений.

Усложняющиеся условия хозяйствования приводят к объективной необходимости постоянных изменений во всех сферах деятельности предприятия. В этом контексте важно, чтобы персонал предприятия был готов к изменениям и восприимчив к инновациям, не отторгая нововведения как нечто враждебное и негативное.

7. Ориентация на долгосрочные перспективы.

Вместе с принятием необходимости постоянных изменений руководству не следует абсолютизировать их. Все изменения направлены на достижение единой стратегической цели предприятия, которая должна оставаться неизменной и не подчиняться сиюминутным требованиям.

Анализ отечественных предприятий с точки зрения указанных особенностей выявляет резкую дифференциацию. Можно заключить, что существуют как инновационно-активные предприятия, постоянно внедряющие современные разработки, так и предприятия, выпускающие продукцию неудовлетворительного качества и не применяющие инновации. Однако специфичной чертой отечественных предприятий является преобладание социального фактора при анализе устойчивости развития, связанного с текущим падением платежеспособности потребителей.

В заключение необходимо отметить важную роль государства в процессе устойчивого развития предприятия. Если предприятие предоставляет рабочие места, а следовательно, способствует сохранению социальной стабильности, государство, в свою очередь, предлагает возможность получения субсидии или налоговых преференций для поддержания устойчивости работы такого предприятия.

Библиографический список

1. *Коробкова, З. В.* Устойчивое развитие промышленных предприятий в глобализированной экономике // Совершенствование институциональных механизмов в промышленности / Под ред. В. В. Титова, В. Д. Марковой. Новосибирск: ИЭОПП СО РАН. 2005. С. 90–101.
2. *Коротков, Э. М.* Антикризисное управление. М.: Инфра-М, 2003.
3. *Ковалев, Д.* Экономическая безопасность предприятия / Д. Ковалев, Т. Сухорукова // Экономика Украины. 1998. № 5. С. 48–52.
4. *Батырмурзаева, З. М.* Обеспечение устойчивого развития промышленных предприятий на основе адаптивной системы управления (на примере нефтегазодобывающей отрасли Республики Дагестан): дис. канд. экон. наук. Институт проблем рынка РАН. Москва, 2015. 180 с.
5. *Степук, Е. И.* Совершенствование метода комплексной оценки устойчивости развития металлургических предприятий: дис. канд. экон. наук. СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2014. 159 с.
6. *Конопляник, Т. М.* Управление устойчивостью хозяйственных систем: теория и методология: автореф. дис. док. экон. наук. СПб.: Институт проблем региональной экономики РАН., 2007. 37 с.
7. *Коряков, А. Г.* Экономическая устойчивость развития предприятий: классификация и ключевые факторы. Серия «Экономика и право». 2012. № 3.
8. *Рябов, В. М.* Устойчивое развитие промышленных предприятий в современных условиях // Вектор науки. 2011. № 4 (18).
9. *Гришаков, К. Р.* Понятие устойчивого развития промышленного предприятия // SCI-ARTICLE. RU. 2013. № 3. URL: http://www.sci-article/ru/.
10. Советский энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1979. 1600 с.
11. *Долятовский, В. А.* Исследование систем управления: уч.-практ. пособие / В. А. Долятовский, В. Н. Долятовская. М.: ИКЦ «МарТ». 2003. 256 с.
12. Философский энциклопедический словарь / Л. Ф. Ильичёв, П. Н. Федосеев, С. М. Ковалёв, В. Г. Панов. М.: Советская энциклопедия, 1983. 840 с.
13. Философская энциклопедия: в 5 т. Т. 1. М.: Советская энциклопедия / Под ред. Ф. В. Константинова. М.: 1960. 504 с.
14. *Амелин, Д. Е.* Местное самоуправление в региональном развитии. Вологда: ВНКЦ ЦЭМИ РАН, 2006. 180 с.
15. *Машунин, Ю. К.* Моделирование и программная реализация инновационного развития промышленного предприятия // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2016. № 3(245).
16. *Григорьева, К. В.* Компьютерное моделирование устойчивого социально-экономического развития России, Казахстана и Японии // Устойчивое инновационное развитие: проектирование и управление. Т. 11. № 1(26). 2015. Ст. 5. URL: www.rypravlenie.ru.
17. *Механцева, К. Ф.* Экономическое моделирование процессов управления современных организаций в аспектах инновационного и устойчивого развития / К. Ф. Механцева, О. К. Карпова, А. А. Юрков. Ростов н/Д: РГЭУ (РИНХ), 2012. 231 с.

УДК 65.012.74

В. М. Милова*
кандидат технических наук, доцент
Э. В. Лодыга*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ ЗАТРАТ НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЙ

В статье рассмотрена методика оптимизации затрат на качество выпускаемой продукции на всех этапах жизненного цикла с применением количественных методов. Методика включает в себя математическую модель задачи планирования структуры производства на основе линейного программирования и FMEA-анализ основных процессов производства.

Предложенная методика позволяет наглядно продемонстрировать возможные угрозы и риски для основных процессов производства изделий, сократить затраты на производство продукции, определив потенциальные несоответствия, и с помощью корректирующих мероприятий в каждом конкретном случае устранить неконформные затраты. Проведенные мероприятия дают возможность предприятию получить дополнительную прибыль и повысить качество выпускаемой продукции.

***Ключевые слова**: управление качеством производства, бизнес-процесс, оптимизация затрат.*

V. M. Milova*
PhD. Tech., Associate Professor
E. V. Lodyga*
Postgraduate Student
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

APPROACHES TO OPTIMIZATION OF LIFE CYCLE STAGES OF THE MANUFACTURING COST

The article discusses the method of optimizing the cost of the quality of products at all stages of the life cycle using quantitative methods. The methodology includes a mathematical model of the problem of planning the structure of production based on linear programming and FMEA-analysis of the main production processes. The proposed method allows you to clearly demonstrate the possible threats and risks to the main processes of production of products, reduce production costs by identifying potential inconsistencies, and with the help of corrective measures in each case eliminate non-conforming costs. These events provide an opportunity for the company to get additional profit and improve the quality of its products.

***Keywords:** production quality management, business process, cost optimization.*

Действующая в России политика импортозамещения, постановление РФ «Об утверждении государственной программы РФ «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» и Распоряжение Правительства РФ «О Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года» ставят перед руководителями отечественных предприятий задачу совершенствования существующих систем управления.

Процессы повышения качества продукции и предупреждения дефектов служат источниками повышения экономической эффективности.

В данной статье рассматриваются бизнес-процессы авиаприборостроительного предприятия ООО «КОНТУР-НИИРС» с точки зрения оптимизации затрат при планировании

производства. Анализ существующего планирования предполагает выявление мест нерационального использования ресурсов при производстве изделий.

Проведенный анализ основных бизнес-процессов показал, что при производстве ключевых изделий просматриваются типовые операции и подпроцессы, то есть существует инвариантная часть изготовления, что позволяет выработать общий подход по оценке затрат на качество и следующим шагом пытаться их оптимизировать.

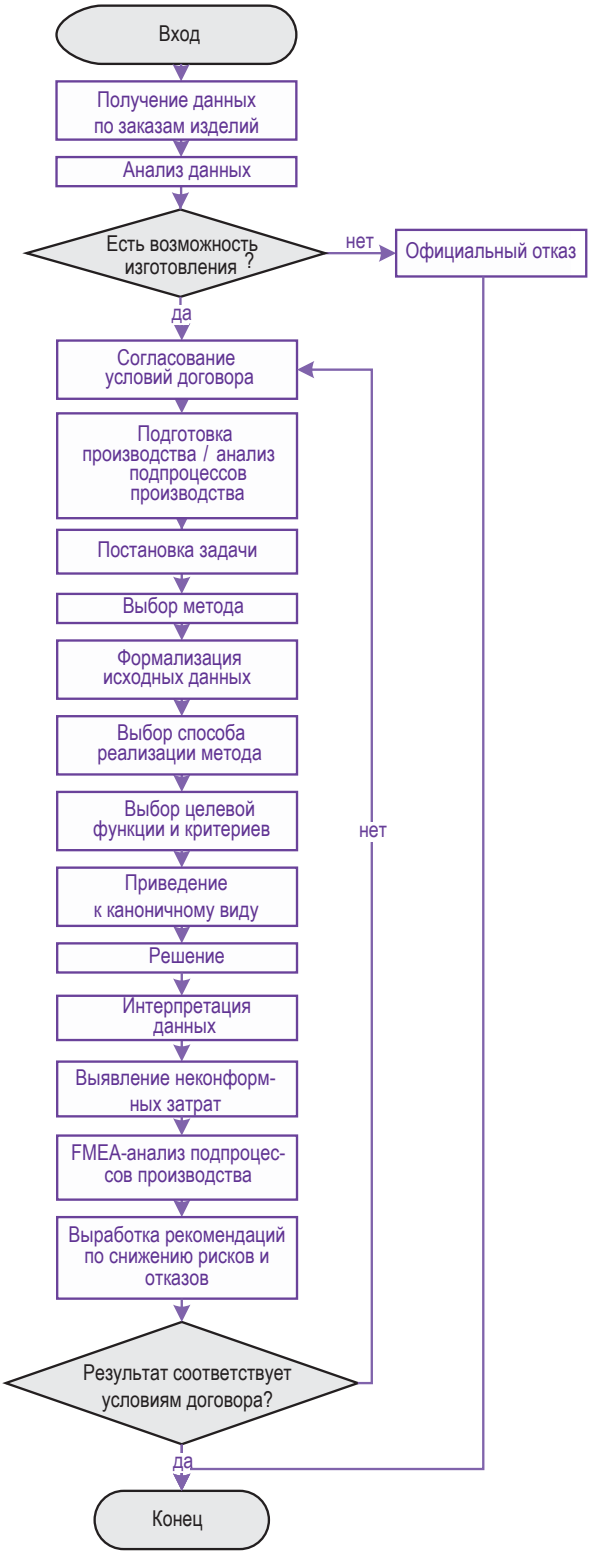
Ниже представлен алгоритм оптимизации затрат с использованием таких инструментов, как метод линейного программирования для планирования производства; оценка конформных и неконформных затрат основных бизнес-процессов предприятия ООО «КОНТУР-НИИРС» на основе процессной модели; PFME -анализ для определения потенциальных несоответствий, приводящих к неконформным затратам и возможности их устранения/предупреждения в виде превентивных мер. Алгоритм представлен на рисунке.

В табл. 1 собраны исходные данные по имеющимся запасам ресурсов на производство в соответствии с производственным планом. Задача оптимизации заключается в том, чтобы при имеющихся ресурсах определить наилучшую номенклатуру изделий производства и ее количество, чтобы доход от реализации такой продукции был наибольшим. При этом план может быть перевыполнен, но в определенных границах, то есть с учетом горизонта планирования и ограничений на ресурсы.

Таблица 1

Исходные данные

Статьи затрат	Изделия						Ограничения ресурсов
	МРЛС	МФИ	УБС	КБО	НРЛС	ЖД	
Корпуса	1	1	2	3	2	2	1500
ПП	2	1	2	5	2	1	1181
Чип-компоненты	19	24	15	24	14	12	11700
Жгуты, провода, кабели	15	2	5	15	15	5	4490
ВЩР	1	0	0	0	1	0	48
Другие ресурсы	6	5	4	7	5	3	3005
Прибыль	498	89	49	109	362	11	



Алгоритм оптимизации затрат при производстве изделий

Обозначив переменными x_1, ..., x_6 количество плановых изделий, имеем:

x_1 – количество бортовых Метео-РЛС (МРЛС);

x_2 – количество многофункциональных индикаторов (МФИ);

x_3 – количество универсальных блоков связи и преобразователей (УБС);

x_4 – количество комплексов бортового оборудования (КБО);

x_5 – количество наземных РЛС (НРЛС);

x_6 – количество продукции Ж/Д (ЖД).

Математическая модель задачи планирования представлена целевой функцией $F(x)$ и системой ограничений (1).

$$F(x)=489x_1+89x_2+49x_3+ +109x_4+362x_5+11x_6\rightarrow\max$$

$$\begin{cases} x_1+x_2+2x_3+3x_4+2x_5+2x_6\le 1500 \\ 2x_1+x_2+2x_3+5x_4+2x_5+x_6\le 1185 \\ 19x_1+24x_2+15x_3+24x_4+ \\ +14x_5+12x_6\le 11725 \\ 15x_1+2x_2+5x_3+15x_4+15x_5+5x_6\le 4495 \\ x_1+x_5\le 48 \\ 6x_1+5x_2+4x_3+7x_4+5x_5+3x_6\le 3010 \end{cases} . \quad (1)$$

Решая систему уравнений (1), с учетом имеющихся ограничений на ресурсы получаем следующее решение:

$$x_1=43,\ x_2=71,\ x_3=241,$$

$$x_4=25,\ x_5=5,\ x_6=409.$$

При этом значение целевой функции $F=486{,}123$ тыс. руб.

На основе полученных результатов можно построить таблицу по выпуску изделий с учетом получившихся затрат.

Получилось 794 изделия, производственный план выполнен с учтенным избытком.

Дальнейший этап методики – это выявление неконформных затрат на потенциальные несоответствия. Проведем анализ подпроцессов процесса производства каждого типа продукции для выявления всех конформных и неконформных затрат с выражением последних в условных единицах (у. е.). Для наглядности результаты анализа на примере подпроцесса «Сборка в узел» представлены в табл. 2.

Таблица 2

Конформные и неконформные затраты типовых подпроцессов производства продукции предприятия

Подпроцесс	Виды затрат, у.е.			
	конформные		неконформные	
Сборка в узел	Затраты на рабочую силу	62	Брак	19
	Расходные материалы	4	Доп. затраты на рабочую силу	31
	Затраты на специальное оборудование	3	Ремонт оборудования	11
Итого		69		61

Исходя из полученных результатов, представленных в табл. 2, можно сделать вывод, что количество неконформных затрат в типовых подпроцессах производства весьма значительно, что требует принятия срочных корректирующих действий.

В соответствии с методикой требуется провести FMEA-анализ подпроцессов производства, выявить причины дефектов, определить влияние дефекта на качество выпускаемых изделий и предложить рекомендации для их устранения. Результаты FMEA-анализа подпроцессов производства продукции предприятия приведены в табл. 3, 4.

С помощью предложенной методики можно сократить затраты на производство продук-

Таблица 3

FMEA-анализ подпроцессов процесса производства изделий предприятия

Подпроцесс производства	Потенциальный дефект	Влияние дефекта		Причины дефекта		Выявление дефекта		ПЧР	Рекомендации
		Описание	S	Описание	O	Описание	D		
Сборка в узел	Несоответствие изделий документам разработчика (КД)	Нарушение плана и сроков изготовления, отсутствие занятости персонала или дополнительная работа персонала	4	Человеческий фактор, устаревшие документы на рабочих местах	4	Проверка версий документов на рабочих местах	6	96	Обучение персонала, обслуживание оборудования, выявление неактуализированной документации на рабочих местах
	Выход из строя оборудования	Отсутствие занятости персонала, нарушение плана и сроков изготовления	4	Человеческий фактор, износ оборудования	2	Планово предупредительное обслуживание оборудования	1	8	Обучение персонала, обслуживание оборудования

Таблица 4

Результаты FMEA-анализа подпроцессов производства продукции предприятия

Подпроцессы	Потенциальные дефекты	Результаты анализа				
		Меры	S	O	D	ПЧР
Сборка в узел	Несоответствие изделий документам разработчика (КД)	Обучение персонала, обслуживание оборудования, выявление неактуализированной документации на рабочих местах	4	3	5	60
	Выход из строя оборудования	Обучение персонала, обслуживание оборудования	4	2	1	8

ции, определив потенциальные несоответствия на каждом этапе технологического процесса, и с помощью корректирующих мероприятий в каждом конкретном случае устранить неконформные затраты. Выявление потенциальных дефектов даст возможность предприятию получить дополнительную прибыль и повысить качество выпускаемой продукции.

Библиографический список

1. *Вентцель, Е. С.* Исследование операций: задачи, принципы, методология. 5-е изд., стер. М.: КНОРУС, 2010. 192 с.
2. Современные инструменты МК. ФМЕА и ДФСС. Ч. 2. / А. Г. Варжапетян, Ю. А. Антохина, Е. Г. Семенова, Н. В. Бондаренко. СПб.: ГУАП, 2011. 136 с.
3. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2015. 32 с.

УДК 658.3.07

В. М. Милова*
кандидат технических наук, доцент
О. А. Феоктистова*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРОЦЕДУРА ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ

В статье приведена процедура оценки одного из важных и дорогостоящих процессов любого предприятия – управления человеческими ресурсами. Процедура разработана на примере отдела по работе с персоналом компании, занимающейся разработкой и производством радиоэлектроники и СВЧ-техники для военного и гражданского применения.

***Ключевые слова**: результативность, результативность процесса, эффективность, компетентность, экспертная оценка.*

V. M. Milova*
PhD. Tech., Associate Professor
O. A. Feoktistova*
Postgraduate Student
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE PROCEDURE FOR EVALUATING THE PERFORMANCE OF THE MANAGEMENT OF HUMAN RESOURCES

A methodology effectiveness evaluation of the human resource management as the most important and expensive auxiliary processes is presented in the articl. The method of development bases on the data of functioning of HR department of the company developing and manufacturing microwave devices for military and civilian applications.

***Keywords:** result achievements; the effectiveness of the QMS; process performance; efficiency; competency; expert assessment.*

Рассматривая систему менеджмента качества (СМК) любой организации и, в частности, обеспечивающий процесс управления персоналом, следует отметить, что управление человеческими ресурсами оказывает огромное влияние на качество продукции и работы организации в целом. В каждой новой версии российских и международных стандартов управлению человеческими ресурсами уделяется все более пристальное внимание.

Персонал – это не только основная движущая сила производства, это еще и важный фактор риска – человеческий фактор, в связи с которым допускаются критичные ошибки в успешно, казалось бы, спланированных проектах. Большая советская энциклопедия определяет человеческий фактор как многозначный термин, описывающий возможность принятия человеком ошибочных или алогичных решений в конкретных ситуациях.

В последнее время в психологической и бизнес-литературе для описания структуры мотивов человека все чаще используют модель «айсберга», основанную на концепции элементов психической организации З. Фрейда. В соответствии с этой моделью считается, что за десятью процентами рационального и логически обоснованного поведения кроется девяностопроцентный пласт скрытых мотивов, инстинктов, чувств. Эти 90% – источник постоянной неопределенности и рисков (рис. 1). В модели при учете человеческого фактора не может быть линейных и однозначных решений, тем не менее в ней есть тенденции, и этими тенденциями можно управлять.

В большинстве случаев роль модератора «айсберга» человеческого фактора выполняет

Рис. 1. Человеческий фактор как источник неопределенности и риска

отдел по работе с персоналом. Его основная задача – обеспечение производственных процессов человеческими ресурсами надлежащего качества. Отсюда следует, что оценка качества деятельности отделов по работе с персоналом вносит большой вклад в общую оценку результативности СМК.

Рассмотрим деятельность отдела по работе с персоналом производства радиоэлектроники и СВЧ-техники для военного и гражданского применения.

Работа с военной продукцией диктует определенные правила. Более жесткие требования к описаниям процессов и регламентирующим их документам, более жесткие требования к услугам сторонних организаций и качеству проводимых процедур. В связи с этим процедура оценки должна учитывать требования ГОСТ РВ 0015-002 -2012 и ГОСТ Р ИСО 10018-2014.

В общем случае организацию работы с человеческими ресурсами можно схематично изобразить в виде этапов в соответствии с рис. 2. Основные работы, входящие в каждый этап, описаны далее.

1. Планирование потребности в персонале. В соответствии с задачами организации, а также статистическими данными и сведениями о сезонных работах осуществляется планирование потребности в персонале. Обычно план подбора персонала составляется на год и корректируется раз в месяц в соответствии с текущей ситуацией и актуальными заявками от руководителей структурных подразделений – заказчиков.

При составлении годового плана учитываются изменения штатного расписания и структуры, соответствующие задачам следующего года (например, расширение производства под определенные проекты, создание дополнительных структурных подразделений или перевод каких-либо обслуживающих функций на аутсорсинг), сезоны отпусков, «мертвые» периоды на рынке труда, коэффициент текучести кадров за предыдущий год и т. д.

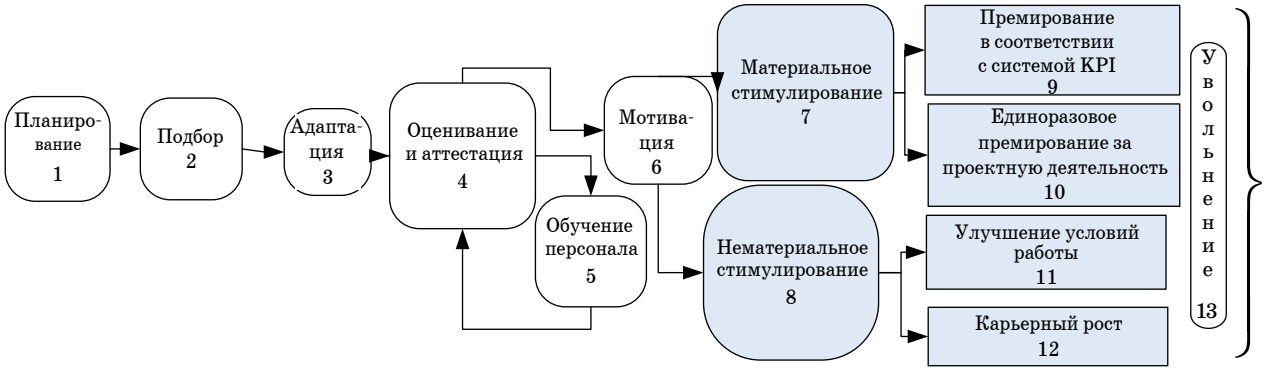


Рис. 2. Организация работы отдела по работе с персоналом

Годовой план-график подбора персонала позволяет создать планы-графики по другим процессам, таким как обучение и оценка, а также дает информацию для смежных подразделений, например, подразделение, отвечающее за охрану труда, получает информацию об оптимальных сроках проведения массовых медосмотров, специальной оценки, инструктажей.

2. Подбор персонала – следующий процесс. Он осуществляется по заявке руководителей структурных подразделений в соответствии с «Положением о подборе персонала». Также на этом этапе осуществляется кадровое делопроизводство – оформление на работу сотрудников, чьи кандидатуры были утверждены.

3. Адаптация персонала – важный процесс, позволяющий новым сотрудникам максимально быстро и эффективно включиться в работу компании и полноценно выполнять свои профессиональные задачи, используя все предоставляемые компанией ресурсы.

4. Аттестация и оценивание – понятия, которые часто используются как синонимы, но применительно к управлению персоналом эти термины имеют разные значения с процедурной и юридической точки зрения. Оценивание персонала – это внутренняя процедура выявления соответствия персонала какому-либо критерию. Это может быть эффективность (связь между достигнутыми результатами и использованными ресурсами) или результативность (степень реализации запланированной деятельности и достижения запланированных результатов) деятельности работников, это может быть наличие тех или иных профессиональных или личностных качеств работников, лояльности организации и т. д. Данные процедур оценивания персонала могут быть основанием для поощрения сотрудников, коррекции процессов управления персоналом, обучения.

Аттестация – это процедура систематической формализованной оценки соответствия деятельности конкретного работника стандарту выполнения работы в должности, которую он занимает. Порядок проведения аттестации устанавливается трудовым законодательством, иными нормативными правовыми актами, содержащими нормы трудового права, локальными нормативными актами. Для ряда должностей и направлений деятельности аттестация – обязательная процедура, исполнение которой контролирует трудовая инспекция. На основании итогов аттестации может быть произведена ротация кадров.

5. Обучение персонала – процесс, которому уделено особое внимание в ГОСТ РВ 0015-002 -2012 «Система разработки и постановки на производство военной техники. Системы менеджмента качества. Общие требования». А также в ГОСТ Р ИСО 10018-2014 «Менеджмент качества. Руководящие указания по вовлечению работников и их компетентности».

Обучение в рассматриваемой организации состоит из планового (обязательного для подтверждения квалификации определенных сотрудников) и текущего. Основанием для проведения текущего обучения являются итоги оценки и аттестации, актуальные потребности, диктуемые изменением производственного процесса, потребности кадрового резерва.

6. Мотивация персонала – одна из ключевых позиций кадровой политики предприятия и серьезный инструмент повышения производительности и эффективности труда. Как известно, материальное стимулирование – мера эффективная в рамках короткого промежутка времени, но оказывающая значительное влияние на удовлетворенность персонала. Нематериальная мотивация – программы, позволяющие строить карьеру внутри организации (кадровый резерв), удовлетворение социальных и психологических потребностей эффективно и результативно работающих сотрудников – более перспективное направление с практически безграничным набором инструментов.

7. Увольнение персонала – этап, завершающий работу сотрудника в организации. Есть мнение, что хорошее увольнение начинается с грамотного найма и должно обернуться благом и для организации, и для увольняемого. Бесконфликтное увольнение – важный показатель качества работы сотрудников отдела по работе с персоналом. Чаще всего находится в ведении руководителя работника и специалиста по кадровому делопроизводству.

Как уже говорилось ранее, управление человеческими ресурсами – вспомогательный процесс СМК организации, его можно представить процессной моделью, разделив процесс на виды работ/подпроцессы (рис. 3):

– Управленческие – процессы стратегического, оперативного и текущего планирования, работы отдела по работе с персоналом.

– Основные – подбор, обучение и оценка персонала.

– Обеспечивающие – процессы создания методик оценки качества человеческих ресурсов, ведение кадрового делопроизводства.

Для управления процессом необходима процедура мониторинга/диагностики процесса управления человеческими ресурсами с точки зрения внутренних подпроцессов и влияния на результативность СМК компании в целом.

Рис. 3. Процессная модель отдела по работе с персоналом ООО НПК «ТИМ»

Оценка результативности процесса управления человеческими ресурсами рассчитывается как средневзвешенная оценка пяти частных показателей первого уровня, приведенных в табл. 1, каждый из которых состоит из показателей второго уровня, для расчета ко-

Таблица 1

Частные показатели первого уровня

№ частного показателя	Название частного показателя	Идентификатор показателя	Содержание частного показателя	Коэффициент значимости показателя (β)	Значения показателей R_i
1	Показатель качества процесса планирования	R_1	Характеризует процент достижения целей отдела по работе с персоналом в области качества и установленных критериев оценки результативности процессов на текущий период	0,15	0,83
2	Показатель качества процесса подбора	R_2	Характеризует процент удовлетворенности руководителей структурных подразделений (заказчиков) качеством и сроками подбора персонала	0,2	0,89
3	Показатель качества процесса адаптации и обучения	R_3	Характеризует процент соответствия подготовки персонала регламентированным требованиям к сотрудникам	0,2	0,69
4	Показатель качества выполнения формальных требований к работе отдела	R_4	Характеризует процент выполнения требований ГОСТ РВ 15.002 и ГОСТ Р ИСО 10018-2014, требований трудовой инспекции	0,1	0,27
5	Показатель качества процесса мотивации	R_5	Характеризует процент удовлетворенности персонала работой в организации	0,3	0,86
6	Показатель качества работы с внешними поставщиками услуг	R_6	Характеризует качество ресурсов, используемых при подборе и обучении персонала	0,05	0,445

торых также применяется средневзвешенная оценка.

Показатели первого уровня отражают качество исполнения основных бизнес-процессов подразделения: планирования, подбора, адаптации, оценки, обучения, мотивации персонала, а также соответствие функционирования отдела по работе с персоналом формальным требованиям ГОСТ РВ 15.002 и ГОСТ Р ИСО 10018-2014, профессиональных стандартов, модели компетенций и прочих регламентирующих документов в соответствии с которыми строится работа предприятия.

Коэффициенты значимости частных показателей первого уровня (табл. 1) устанавливаются экспертным методом.

Оценка результативности включает следующие этапы:

1. Выбор показателей первого и второго уровня.

2. Определение значимости выбранных показателей.

3. Определение интегрального показателя.

Интерпретация полученного значения интегрального показателя для оценки результативности управления человеческими ресурсами.

В соответствии с перечисленными этапами процедуры в табл. 1 представлены выбранные показатели первого уровня, их весовые коэффициенты и результаты их оценки на основе рассчитанных значений показателей второго уровня.

Значение интегрального показателя результативности представляет собой количественную величину $R_{\text{учр}}$, определяемую по формуле

$$R_{\text{учр}} = \sum_{i=1}^{6} \beta_i * R_i, \qquad (1)$$

где R_i – значение i-го частного показателя первого уровня; β_i –коэффициент значимости i-го частного показателя первого уровня, приведенный в табл. 1.

В табл. 2 приведена шкала для оценки степени результативности процесса.

Таблица 2

Шкала оценки результативности процесса

Полученная количественная оценка результативности УЧР	Степень результативности УЧР
$R_{\text{УЧР}} < 0{,}40$	недопустимая
$0{,}40 \le R_{\text{УЧР}} < 0{,}60$	допустимая
$0{,}60 \le R_{\text{УЧР}} < 0{,}80$	достаточная
$R_{\text{УЧР}} \ge 0{,}80$	высокая

На основе рассчитанных значений по формулам (3)–(15) и весовых коэффициентов из табл. 1 можно вычислить интегральный показатель результативности по формуле (1), который равен

$$R_{\text{учр}} = (0{,}15 \cdot 0{,}83) + (0{,}2 \cdot 0{,}89) + (0{,}2 \cdot 0{,}69) + (0{,}1 \cdot 0{,}86) + (0{,}05 \cdot 0{,}445) = 0{,}74. \qquad (2)$$

Полученная оценка результативности управления человеческими ресурсами оценивается как достаточная, но предполагает предупреждающие действия для ее улучшения. Ориентируясь на частные показатели первого уровня (табл. 1), можно сделать выводы о том, в каких направлениях следует предпринять корректирующие воздействия.

Расчет показателей первого уровня на основе показателей второго уровня

Показатель первого уровня R_1 – показатель качества процесса планирования определяется с учетом двух показателей второго уровня: достижения целей отдела по работе с персоналом и фактических величин критериев результативности процессов на текущий период.

Показатель R_1 рассчитывается по следующей формуле:

$$R_1 = \frac{\sum_{i=1}^{M_{\text{крп}}} W_i + \sum_{i=1}^{M_{\text{ц}}} Z_j}{M_{\text{кпр}} + M_{\text{ц}}}, \qquad (3)$$

где W_i – «вклад в R_1» i-го критерия результативности процессов; Z_j – «вклад в R_1» j-го критерия достижения целей; $M_{\text{крп}}$ – количество критериев результативности процессов для R_1; $M_{\text{ц}}$ – количество критериев достижения поставленных на год целей.

Величина W_i «вклад в R_1» i-го критерия результативности процессов принимает значение в зависимости от того, какие действия требуется произвести при фактической величине критерия (табл. 3):

$$W_i = \begin{cases} 0 \text{ – если требуются корректирующие действия;} \\ 0{,}5 \text{ – если требуются предупреждающие действия;} \\ 1 \text{ – если действия не требуются.} \end{cases}$$

В случае подведения промежуточных итогов несколько раз в год (например, поквартально) W_i рассчитывается как среднее арифметическое всех промежуточных итогов.

Таблица 3

Сведения о мониторинге критериев оценки результативности процессов

№ п/п	Процесс	Критерии результативности	Мониторинг процессов						Вклад критерия W_i				
			границы изменения		квартал				квартал				год
			верхняя	нижняя	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
1	Кадровое делопроизводство	Отношение количества документов КДП, прошедших внутренний аудит без замечаний к общему количеству документов КДП	0,95	0,90	0,85	0,91	0,91	0,93	0	1	0,5	1	0,625
2	Планирование потребности в персонале	Количество отклонений от ежемесячного плана подбора	2	0	0	0	1	2	1	1	1	0	0,75
3	Подбор	Срок выполнения заявок на подбор персонала после их официальной регистрации как входящих документов отдела по работе с персоналом	5	3	3	4	3	4	1	0,5	1	0,5	0,75
4	Подготовка персонала	Доля положительных итогов аттестации персонала	0,98	0,95	1	1	1	0,97	1	1	1	0,5	0,875
		Процент выполнения годового плана обучения персонала	1	0,95	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Количество критериев результативности процессов (приведенных в табл. 3)

$$M_{\text{крп}} = 5.$$

Суммарный вклад критерия результативности процессов

$$\sum_{i=1}^{M_{\text{кпр}}} W_i = 0{,}625 + 0{,}75 + 0{,}75 + 0{,}875 + 1 = 4. \quad (4)$$

Величина Z_i «вклад в R_1» критерия достижения i-й цели, поставленной на год, принимает значение в зависимости от того, достигнута ли цель.

$$Z = \begin{cases} 0 - \text{если цель не достигнута;} \\ 1 - \text{если цель достигнута.} \end{cases}$$

Допустим, на год принято семь целей в области качества, из них одна не выполнена:

$$M_{\text{ц}} = 7; \ \sum_{j=1}^{\text{M}_{\text{ц}}} Z_j = 6. \quad (5)$$

В приведенном примере показатель R_1 качества процесса планирования рассчитывается в соответствии с формулой (3):

$$R_1 = \frac{\sum_{i=1}^{M_{\text{крп}}} W_i + \sum_{j=1}^{M_{\text{ц}}} Z_j}{M_{\text{крп}} + M_{\text{ц}}} = \frac{4+6}{5+7} = 0{,}83. \quad (6)$$

Показатель первого уровня R_2 характеризует процент удовлетворенности руководителей структурных подразделений (заказчиков) качеством и сроками подбора персонала. Частные показатели второго уровня приведены в табл. 4. Показатель R_2 рассчитывается по следующей формуле:

$$R_2 = \frac{\sum_{i=1}^{3} \lambda_i * \eta_i}{3}, \quad (7)$$

где η_i – значение i-го частного показателя второго уровня; λ_i – коэффициент значимости i-го частного показателя второго уровня, приведенный в табл. 4.

Пример расчета частных показателей второго уровня для определения R_2:

$$S_1 = \frac{\text{количество принятых сотрудников}}{\text{количество сотрудников, прошедших испытательный срок}} = \frac{12}{13} = 0{,}92. \quad (8)$$

Показатели S_2, S_3 оцениваются руководителями, являющимися заказчиками подбора персонала, и оценивают качество подбора персонала по пятибалльной шкале. Оценки шести

Таблица 4

Частные показатели второго уровня для расчета R_2

№ показателя	Обозначение показателя	Содержание частного показателя второго уровня	Коэффициент значимости показателя (λ_i)	Значение показателя в приведенном примере (η_i)
1	S_1	Процент персонала, успешно прошедшего испытательный срок	0,3	0,92
2	S_2	Процент удовлетворенности руководителей качеством подбора персонала по итогам годовой промежуточной оценки	0,4	0,86
3	S_3	Процент удовлетворенности руководителей сроками подбора персонала по итогам годовой промежуточной оценки	0,3	0,9

руководителей по показателям представлены в табл. 5 и 6 соответственно.

Таблица 5

Оценка показателя S_2

Эксперт	Оценка
Руководитель 1	4
Руководитель 2	5
Руководитель 3	4
Руководитель 4	5
Руководитель 5	3
Руководитель 6	5

Таблица 6

Оценка показателя S_3

Эксперт	Оценка
Руководитель 1	5
Руководитель 2	5
Руководитель 3	5
Руководитель 4	5
Руководитель 5	4
Руководитель 6	3

Расчет значений частных показателей S_2 и S_3 представлен в (9), (10) соответственно.

$$S_2 = 26 \cdot \frac{100}{30} = 86\% = 0{,}86, \quad (9)$$

$$S_3 = 27 \cdot \frac{100}{30} = 90\% = 0{,}89. \quad (10)$$

В приведенном примере показатель качества процесса подбора персонала

$$R_2 = \frac{0{,}92 + 0{,}86 + 0{,}9}{3} = 0{,}89. \quad (11)$$

Показатель первого уровня R_3 характеризует процент соответствия подготовки персонала регламентированным требованиям к сотрудникам. Частные показатели второго уровня для его расчета приведены в табл. 7

Показатель R_3 рассчитывается по следующей формуле:

$$R_3 = \frac{\sum_{i=1}^{\delta_i} {}^{*}T_i}{4}, \quad (12)$$

где T_i – значение i-го частного показателя второго уровня; δ_i – коэффициент значимости i-го частного показателя второго уровня.

В нашем случае

$$R_3 = \frac{\left(\begin{array}{l} (0{,}7 \cdot 0{,}25) + (0{,}89 \cdot 0{,}25) + \\ + (0{,}93 \cdot 0{,}25) + (0{,}28 \cdot 0{,}25) \end{array} \right)}{4} = \\ = \frac{0{,}17 + 0{,}22 + 0{,}23 + 0{,}07}{4} = 0{,}69. \quad (13)$$

Показатель первого уровня R_4 характеризует процент выполнения требований ГОСТ РВ 15.002 и ГОСТ Р ИСО 10018-2014. Определяется как средневзвешенная оценка частных показателей второго уровня, приведенных в табл. 8.

Таблица 7

Частные показатели второго уровня для расчета R_3

№ показателя	Обозначение показателя	Содержание частного показателя второго уровня	Коэффициент значимости показателя (δ)	Значения показателей
1	T_1	Процент соответствия персонала модели ключевых компетенций	0,25	0,7
2	T_2	Процент соответствия знаний и навыков работников требованиям должностной инструкции в соответствии с ежегодной оценкой	0,25	0,89
3	T_3	Процент сотрудников, успешно прошедших адаптацию	0,25	0,93
4	T_4	Процент сотрудников, прошедших обучение в отчетном году	0,25	0,28

Таблица 8

Частные показатели второго уровня для расчета R_4

№ показателя	Обозначение показателя	Содержание частного показателя второго уровня	Коэффициент значимости показателя	Значение показателя в приведенном примере
1	U_1	Процент проведенных без нарушений операций кадрового делопроизводства	0,4	0,97
2	U_2	Процент изменения проектов и разработок, имеющих документальное подтверждение	0,3	0,48
3	U_3	Процент процессов отдела по работе с персоналом, имеющих описание в регламентирующих документах и инструкциях	0,3	1

Таблица 9

Частные показатели второго уровня для расчета R_6

№ показателя	Обозначение показателя	Содержание частного показателя второго уровня	Коэффициент значимости показателя (μ)	Значение показателя в приведенном примере
1	V_1	Доля поставщиков, оказывающих услуги по подбору, обучению и аттестации персонала, имеющих документально подтвержденные сведения об оценке	0,5	1
2	V_2	Доля поставщиков, не имевших в течение года нареканий к качеству продукции	0,5	0,78

В приведенном примере показатель качества процесса адаптации и обучения

$$R_4 = \frac{(0,97 \cdot 0,4) + (0,48 \cdot 0,3) + (1 \cdot 0,3)}{3} = \\ = \frac{0,38 + 0,14 + 0,3}{3} = 0,27. \quad (14)$$

Показатель первого уровня R_5 характеризует процент удовлетворенности персонала работой в организации. Определяется при помощи проективной методики «Цветовых метафор» И. Л. Соломина, позволяющей анализировать мотивы с точки зрения базовых и актуальных потребностей человека.

В рамках данной процедуры величина R_5 будет характеризоваться процентом персонала, для которого работа в компании коррелирует с удовлетворением базовых и/или актуальных потребностей на значимом уровне.

Показатель R_5 рассчитывается по следующей формуле:

$$R_5 = \frac{\begin{array}{c}\text{количество сотрудников,} \\ \text{для которых работа} \\ \text{в компании коррелирует} \\ \text{с актуальными или} \\ \text{базовыми потребностями}\end{array}}{\begin{array}{c}\text{количество сотрудников} \\ \text{в организации}\end{array}} = \frac{33}{38} = 0,86. \quad (15)$$

Показатель первого уровня R_6 характеризует качество ресурсов, используемых при подборе, обучении и оценке персонала. Частные показатели второго уровня для его расчета приведены в табл. 9.

Показатель R_6 рассчитывается по следующей формуле:

$$R_6 \frac{\sum_{i=1}^{\mu i} {}^*V_i}{4} = \frac{(0,5 \cdot 1) + (0,5 \cdot 0,78)}{2} = \\ = \frac{0,89}{92} = 0,445. \quad (16)$$

Заключение

Оценка – важная стадия сложного процесса управления качеством объектов. Без информации об уровне свойств и качеств рассматриваемых объектов нет возможности для обоснованного принятия управленческих решений и последующего осуществления соответствующего превентивного или корректирующего воздействия на объект с целью изменения качества.

Рассмотренная процедура предлагает показатели и способ оценки результативности СМК отдела по работе с персоналом и служит для ежегодного аудита, мониторинга и измерения процессов и результатов работы с человеческими ресурсами. Она проста в применении, позволяет быстро и эффективно произвести оценку

работы отдела, увидеть слабые стороны, требующие корректировки, и спланировать будущую деятельность.

Библиографический список

1. *Соломин, И. Л.* Современные методы психологической экспресс-диагностики и профессионального консультирования М.: Речь, 2006. 279 с.
2. Смешанный метод оценки уровня качества продукции: метод. указания для выполнения практических занятий по дисциплине «Управление качеством» для студентов всех форм обучения; сост. В. В. Беспалов, Г. К. Сорокин. Н. Новгород: НГТУ. 2010. 24 с.
3. *Милова, В. М.* Методика оценивания значимости критериев решения проблемы (на примере системы менеджмента качества вуза // Менеджмент XXI века: управление развитием: матер. V междунар. науч.-практич. конференции. СПб.: Книжный Дом, 2005. С. 204.
4. *Можаева, Т. П.* Разработка подсистемы управления качеством персонала в системе менеджмента качества предприятия // Вестник Брянского государственного технического университета. 2011. № 4. С. 111–120.
5. *Добряков, А. А.* Экспертно-аналитический метод оценки качества образовательных систем на основе нечетко-множественного подхода / А. А. Добряков, В. М. Милова // Качество. Инновации. Образование. 2006. № 6. С. 21–26.

УДК 67.02

Н. В. Старцева*
студент
А. Ю. Новикова*
студент
С. А. Назаревич*
кандидат технических наук
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МОДЕЛИ СЦЕНАРИЕВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ДЕФЕКТОВ ИЗДЕЛИЙ, СОЗДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В статье рассмотрена проблема низкокачественной печати, а также факторы, влияющие на возникновение дефектов при создании объемных 3D-моделей.

***Ключевые слова**: модели, диагностика, дефекты, аддитивные технологии, качество, процессы.*

N. V. Startseva*
Student
A. Yu. Novikova*
Student
S. A. Nazarevich*
PhD. Tech.
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

MODELS OF SCENARIOS FOR DIAGNOSTICS OF PRODUCT DEFECTS CREATED BY ADDITIVE TECHNOLOGIES

The article considers the problem of low-quality printing, as well as the factors that influence the appearance of defects in the creation of 3D models.

***Keywords:** models, diagnostics, defects, additive technologies, quality, processes.*

Любая компания по производству продукции стремится максимально удовлетворить запросы потребителей. Однако для последних товар приобретает действительную ценность только в то время, когда происходит непосредственная обработка и изготовление тех элементов, которые необходимы потребителю для использования товара. На любом производстве существует деятельность, которая потребляет ресурсы, но приводит не к созданию конечной ценности, а к потерям.

Для устранения основных видов потерь традиционно используют такую концепцию менеджмента, как бережливое производство. Модель бережливого производства впервые запустили на предприятии «Тойота» в 1950-е годы, после чего эту концепцию стали с успехом внедрять и другие предприятия.

Сутью бережливого производства является рассмотрение каждого действия с целью выявления и минимизации тех, которые не создают ценностей для конечного потребителя, и применения метода сценариев для снижения издержек производства на поиск решения.

Сегодня с помощью аддитивных технологий можно изготавливать объемные изделия практический любой конфигурации и уровня сложности. Технология трехмерной печати постоянно совершенствуется: модифицируются 3D-принтеры, обновляется специализированное программное обеспечение, применяются новые расходные материалы. Однако проблема качества печати остается неизменно актуальной.

Для получения статистических данных в лаборатории аддитивных технологий было напечатано 30 объемных моделей единой конфигу-

рации, но с различным набором входных данных. Исходным материалом для печати был выбран ABS-пластик с техническими характеристиками, представленными в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики ABS-пластика

Характеристики	Значение
Температура плавления	180–220°
Температура размягчения	100–150°
Температура остывания	90–100°
Температура нагрева стола для печати	90–105°

После печати была произведена оценка качества исследуемых моделей и составлена таблица, включающая в себя входные параметры при печати, а также выявленные дефекты (табл. 2).

После проведения зрительного анализа полученных моделей была составлена таблица классификации выявленных дефектов с их описанием (табл. 3).

Для выявления главных факторов, влияющих на качество печати, была составлена диаграмма Парето (см. рисунок).

Исходя из результатов проведенного исследования и визуализации данных в виде диаграммы, можно сделать вывод, что наиболее часто встречающиеся дефекты связаны с нарушением

Таблица 2

Протокол испытания

Номер модели	Параметры модели	Выявленные дефекты
Модель 1	$t_1 = 180$; $t_2 = 180$; $t_{ст} = 70$ Высота слоя – 0,25 мм Заполняемость – 70% Толщина оболочки детали – 1 мм $K_м = 1,5$	Отслоение детали от стола для печати, образование пустот между слоями, нарушение геометрии, непропечатывание мелких деталей
Модель 2	$t_1 = 180$; $t_2 = 185$; $t_{ст} = 80$ Высота слоя – 0,25 мм Заполняемость – 75% Толщина оболочки детали – 1 мм $K_м = 1,6$	Отслоение детали от стола для печати, образование пустот между слоями
Модель 3	$t_1 = 180$; $t_2 = 185$; $t_{ст} = 90$ Высота слоя – 0,25 мм Заполняемость – 75% Толщина оболочки детали – 1 мм $K_м = 1,7$	Плохое прилипание детали к поверхности стола, образование пустот между слоями, нарушение геометрии, непропечатывание мелких деталей
Модель 4	$t_1 = 185$; $t_2 = 190$; $t_{ст} = 95$ Высота слоя – 0,25 мм Заполняемость – 97% Толщина оболочки детали – 1,3 мм $K_м = 1,8$	Плохое прилипание детали к поверхности стола, нарушение геометрии, образование нитей
Модель 5	$t_1 = 185$; $t_2 = 190$; $t_{ст} = 95$ Высота слоя – 0,25 мм Заполняемость – 97% Толщина оболочки детали – 1,3 мм $K_м = 1,8$	Плохое прилипание детали к поверхности стола, образование незначительных пустот между слоями, образование нитей
Модель 6	$t_1 = 190$; $t_2 = 190$; $t_{ст} = 100$ Высота слоя – 0,26 мм Заполняемость – 97% Толщина оболочки детали – 1,4 мм $K_м = 1,8$	Образование затеков и нитей
Модель 7	$t_1 = 190$; $t_2 = 195$; $t_{ст} = 100$ Высота слоя – 0,26 мм Заполняемость – 85% Толщина оболочки детали – 1,4 мм $K_м = 1,9$	Нарушение геометрии, непропечатывание мелких деталей
Модель 8	$t_1 = 190$; $t_2 = 195$; $t_{ст} = 101$ Высота слоя – 0,27 мм Заполняемость – 80% Толщина оболочки детали – 1,5 мм $K_м = 1,7$	Образование нитей и небольших пустот между слоями, незначительное нарушение геометрии

Продолжение табл. 2

Номер модели	Параметры модели	Выявленные дефекты
Модель 9	$t_1 = 195$; $t_2 = 195$; $t_{ст} = 101$ Высота слоя – 0,27 мм Заполняемость – 87% Толщина оболочки детали – 1,5 мм $K_м = 1,7$	Значительных дефектов не обнаружено
Модель 10	$t_1 = 195$; $t_2 = 195$; $t_{ст} = 102$ Высота слоя – 0,27 мм Заполняемость – 90% Толщина оболочки детали – 1,5 мм $K_м = 1,7$	Небольшое образование затеков пластика
Модель 11	$t_1 = 197$; $t_2 = 195$; $t_{ст} = 101$ Высота слоя – 0,27 мм Заполняемость – 95% Толщина оболочки детали – 1,5 мм $K_м = 1,7$	Значительных дефектов не обнаружено
Модель 12	$t_1 = 195$; $t_2 = 200$; $t_{ст} = 103$ Высота слоя – 0,27 мм Заполняемость – 90% Толщина оболочки детали – 1,5 мм $K_м = 1,7$	Значительных дефектов не обнаружено
Модель 13	$t_1 = 195$; $t_2 = 205$; $t_{ст} = 103$ Высота слоя – 0,27 мм Заполняемость – 80% Толщина оболочки детали – 1,5 мм $K_м = 1,7$	Значительных дефектов не обнаружено
Модель 14	$t_1 = 200$; $t_2 = 200$; $t_{ст} = 102$ Высота слоя – 0,27 мм Заполняемость – 95% Толщина оболочки детали – 1,5 мм $K_м = 1,7$	Затеки пластика, нарушение геометрии, образование нитей
Модель 15	$t_1 = 200$; $t_2 = 205$; $t_{ст} = 102$ Высота слоя – 0,27 мм Заполняемость – 95% Толщина оболочки детали – 1,5 мм $K_м = 1,7$	Затеки пластика, нарушение геометрии, образование нитей
Модель 16	$t_1 = 205$; $t_2 = 200$; $t_{ст} = 105$ Высота слоя – 0,27 мм Заполняемость – 80% Толщина оболочки детали – 1,5 мм $K_м = 1,7$	Плохое пропечатывание первого слоя, плохое отлипание детали от стола, незначительное нарушение геометрии модели, незначительные пустоты между слоями
Модель 17	$t_1 = 205$; $t_2 = 205$; $t_{ст} = 105$ Высота слоя – 0,27 мм Заполняемость – 95% Толщина оболочки детали – 1,5 мм $K_м = 1,7$	Плохое отлипание детали от стола, нарушение геометрии первого слоя
Модель 18	$t_1 = 210$; $t_2 = 205$; $t_{ст} = 100$ Высота слоя – 0,27 мм Заполняемость – 90% Толщина оболочки детали – 1,5 мм $K_м = 1,7$	Значительных дефектов не обнаружено
Модель 19	$t_1 = 210$; $t_2 = 210$; $t_{ст} = 100$ Высота слоя – 0,27 мм Заполняемость – 90% Толщина оболочки детали – 1,5 мм $K_м = 1,7$	Образование нитей пластика
Модель 20	$t_1 = 215$; $t_2 = 215$; $t_{ст} = 105$ Высота слоя – 0,27 мм Заполняемость – 90% Толщина оболочки детали – 1,5 мм $K_м = 1,7$	Образование затеков пластика, плохое отлипание печати от стола, непропечатывание мелких деталей

Окончание табл. 2

Номер модели	Параметры модели	Выявленные дефекты
Модель 21	$t_1 = 220$; $t_2 = 215$; $t_{ст} = 105$ Высота слоя – 0,27 мм Заполняемость – 90% Толщина оболочки детали – 1,5 мм $K_м = 1,7$	Плохое отлипание детали от стола, нарушение геометрии первого слоя, образование затеков пластика, образование нитей
Модель 22	$t_1 = 220$; $t_2 = 220$; $t_{ст} = 100$ Высота слоя – 0,27 мм Заполняемость – 90% Толщина оболочки детали – 1,5 мм $K_м = 1,7$	Плохое отлипание детали от стола, нарушение геометрии первого слоя, образование затеков пластика, образование нитей
Модель 23	$t_1 = 200$; $t_2 = 215$; $t_{ст} = 100$ Высота слоя – 0,27 мм Заполняемость – 95% Толщина оболочки детали – 1,5 мм $K_м = 1,7$	Нарушение геометрии первого слоя
Модель 24	$t_1 = 195$; $t_2 = 220$; $t_{ст} = 100$ Высота слоя – 0,27 мм Заполняемость – 95% Толщина оболочки детали – 1,5 мм $K_м = 1,7$	Значительных дефектов не обнаружено
Модель 25	$t_1 = 190$; $t_2 = 200$; $t_{ст} = 100$ Высота слоя – 0,27 мм Заполняемость – 85% Толщина оболочки детали – 1,5 мм $K_м = 1,7$	Образование небольших пустот между слоями
t_1 – температура первого слоя; t_2 – температура последующих слоев; $t_{ст}$ – температура стола.		

Таблица 3

Классификация дефектов

Тип дефекта	Описание	Потенциальная причина
Нарушение геометрии модели	Нарушение формы печатаемой модели	1. Не произведена калибровка платформы для печати 2. Неправильно выбрано положение модели для печати 3. Перегрев пластика 4. Высокая скорость печати
Коробление модели	Отклеивание модели от платформы, изгибание пластика, плохое отлипание модели от печатного стола	1. Плохая обработка платформы для печати 2. Неправильно выбран температурный режим стола для печати 3. Нарушение технологии извлечения модели после завершения печати
Нити	Модель покрывается тонкими нитями пластика, которые могут сочетаться с серьезными провисаниями	1. Выбрана слишком высокая температура для печати 2. Не настроена дистанция втягивания 3. Не настроена скорость втягивания 4. Загрязнение сопла
Затеки пластика	Образование излишков пластика на поверхности модели	Неправильно выбран температурный режим
Образование пустот	Образование видимых пустот между слоями, отсутствие некоторых слоев	1. Недоэкструдирование пластика 2. Неправильно выбран коэффициент заполнения 3. Слишком высокая скорость печати 4. Засорение сопла 5. Прокручивание подающей нити
Непропечатывание некоторых деталей	Мелкие детали не пропечатываются или получаются очень хрупкими и ломкими	1. Неправильно выбрана ширина сопла для печати 2. Нарушение в конструкции детали (слишком маленькие детали, которые необходимо увеличить)

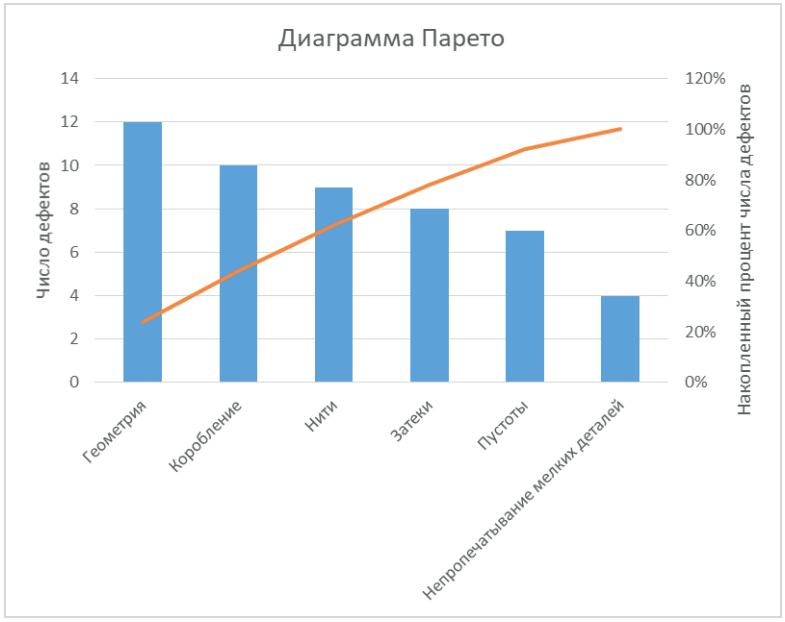


Диаграмма Парето, анализ дефектов

геометрии печатаемых моделей, а также с короблением.

Для предупреждения появления дефектов при создании 3D-моделей можно определить ряд рекомендаций, способствующих улучшению качества печати.

Перед началом печати необходимо подготовить 3D-принтер для печати:

– произвести калибровку рабочей поверхности для печати по осям XYZ;

– проверить проходимость материала через печатающее сопло;

– осмотреть нити пластика на наличие грязи, повреждений и изломов;

– правильно заправить пластик в отверстие для подачи;

– очистить стол для печати и произвести обработку специальными средствами.

Для подготовки 3D-модели необходимо:

– правильно выбрать расположение модели на печатной поверхности (от этого будет зависеть ее прочность), а также по возможности выбрать плоское основание;

– выбрать температуру для печати и температуру для рабочей поверхности в зависимости от выбранного типа пластика и его технических характеристик;

– произвести настройку параметров печати: заполняемость (выбирается индивидуально, однако рекомендуется не менее 30%); толщина стенок модели (для любого типа пластика рекомендуется не менее 2 мм); скорость печати (рекомендуется 50% от заданной скорости); толщина слоя (рекомендуется выбирать не больше, чем 80% от диаметра сопла).

Таким образом, можно сделать вывод, что выполнение приведенных в данной статье рекомендаций для подготовки к печати трехмерных моделей на 3D-принтере поможет избежать появления значительного числа дефектов и повысит качество объемных изделий.

Библиографический список

1. *Кэнесс, Э.* Доступная 3D-печать для науки, образования и устойчивого развития / Э. Кэнесс, К. Фонда, М.: Дзеннаро. 2013. 132 с.
2. *Горький, Д.* 3D-печать с нуля. 2015. 400 с.
3. *Строганов, Р.* 3D-печать. Коротко и максимально ясно / Р. Строганов. 2016. 73 с.
4. *Назаревич, С. А.* Системный анализ технических характеристик, формирующих инновационность продукции / С. А. Назаревич, С. Л. Поляков // Системный анализ и логистика. 2016. № 12. С. 81–86.
5. *Коршунов, Г. И.* Методика первичной оценки инновационных проектов для последующей реализации на промышленном предприятии / Г. И. Коршунов, А. М. Дозмаров // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 10. С. 60–64.
6. *Лахтин, Г. А.* Трудные пути инноваций / Г. А. Лахтин, Л. Э. Миндели // Вестник российской академии наук. 1998. Т. 68. № 4. С. 306–313.

УДК 62-529

А. В. Чабаненко*
старший преподаватель
В. О. Смирнова*
кандидат технических наук
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ С УЧЕТОМ ВХОДИМОСТИ МОДУЛЕЙ РЭА

В статье рассмотрены аспекты, связанные с управлением качеством процесса послойного синтеза корпусных элементов радиоэлектронной аппаратуры с учетом модульных конструкций.

***Ключевые слова**: радиоэлектроника, аддитивные технологии, корпусные элементы, послойный синтез объектов.*

A. V. Chabanenko*
Senior Lecturer
V. O. Smirnova*
PhD. Tech.
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

QUALITY ASSURANCE OF BODY ELEMENTS MADE BY ADDITIVE TECHNOLOGIES TAKING INTO ACCOUNT THE INPUT OF REA MODULES

The article deals with the aspects related to the quality control of the process of layer-by-layer synthesis of body elements of REA with modular structures.

***Keywords:** Radio Electronics, additive technologies, body elements, layered synthesis of objects.*

На текущем этапе развития технологий методы послойного синтеза изделий-прототипов, которые входят в аддитивные технологии, позволяют получать деталь не путем снятия слоя материала с заготовки, как это принято в традиционных способах обработки, а за счет послойного наращения материала с одновременным получением заданной формы и размеров изделия. При этом главная особенность этих методов заключается в обязательном применении трехмерного компьютерного проектирования изделия как исходного этапа технологии послойного синтеза. Особенно перспективным применение данных технологий видится в сфере производства корпусных элементов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) ввиду их способности учитывать специфику оборудования.

Использование аддитивных технологий обеспечивает повышение эксплуатационных показателей и уменьшение влияния форм-фактора корпуса на этапе производства.

Для корпусов характерны устойчивость к физическому воздействию, длительный срок эксплуатации, термоустойчивость, высокие антикоррозийные свойства, устойчивость к химическим воздействиям, удобство в перемещении.

Принципы обеспечения качества корпусных элементов РЭА представлены на рис. 1.

При конструировании корпусных элементов РЭА выполняются следующие работы:

– изучение функциональных схем для выявления одинаковых по назначению подсхем и унификации их структуры в пределах конкретного изделия;

– выбор конструктива;

– конструирование печатной платы;

– выбор способов защиты модуля от перегрева и внешних воздействий.

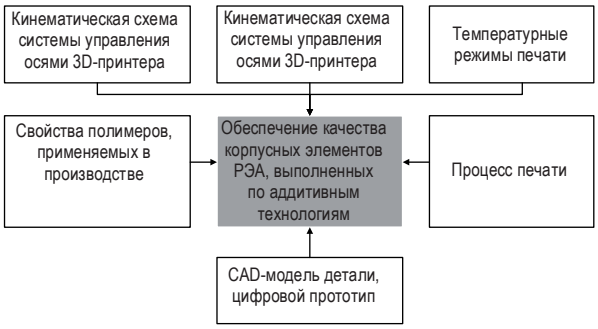
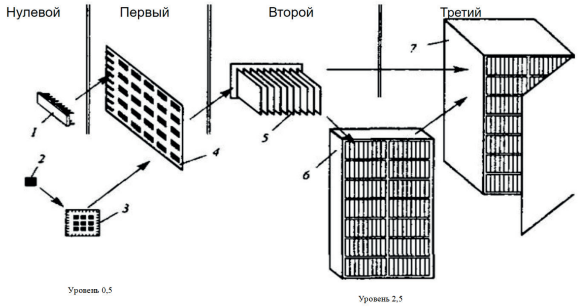


Рис. 1. Факторы, влияющие на обеспечение качества аддитивного производства корпусов РЭА



1 - микросхема; 2 - бескорпусная микросхема; 3 - микросборка; 4 - типовой элемент замены (ТЭЗ), ячейка; 5 - блок; 6 - рама; 7 - стойка

Рис. 2. Конструктивная иерархия и входимости модулей РЭА

При производстве корпусных элементов необходимо делать акцент на входимости произведенных корпусов в модули РЭА. Входимость модулей РЭА представлена на рис. 2.

При формировании корпуса РЭА необходимо учитывать показатели, которые влияют на производство корпусных элементов.

Управление качеством процесса послойного синтеза корпусных элементов РЭА базируется на испытаниях, проводимых в рамках оценки и выявления показателей качества корпусных элементов РЭА.

Образцы для исследования радиопрозрачности выполнены по технологии МПН, предусмотренной ГОСТ Р 57586-2017.

Для выявления основных видов дефектов, возникающих в процессе производства корпусных элементов РЭА с использованием аддитивных технологий, построена диаграмма Парето (рис. 3).

Для контроля формы поверхности использованы методы, базирующиеся на использовании координатных измерительных машин и обладающие большой универсальностью и точностью.

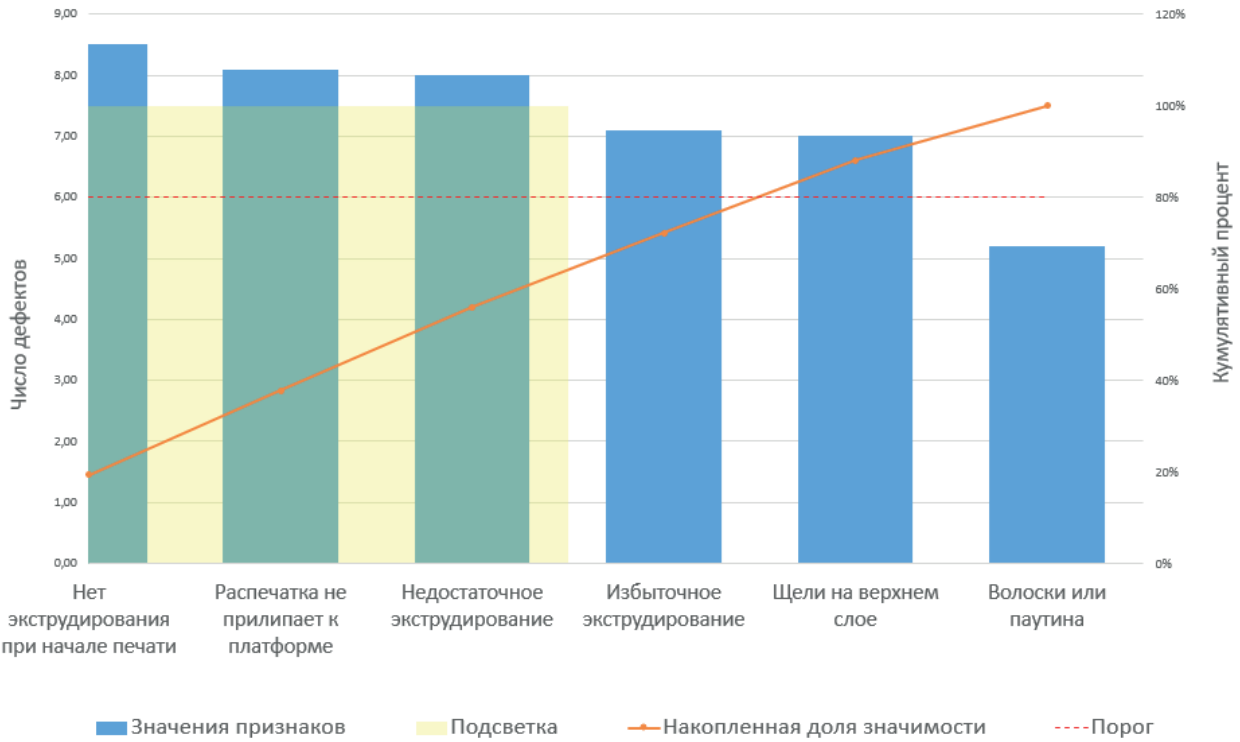


Рис. 3. Распределение видов дефектов в процессе печати

Обработка результатов измерений проводилась с помощью стандартной программы и заключалась в аппроксимации экспериментальных точек поверхностью второго порядка методом наименьших квадратов.

Кривая Лоренца на диаграмме позволила выделить из общей массы наиболее важные дефекты, устранение которых способствует значительному снижению уровня брака.

По результатам диаграммы Парето дефекты, составляющие основную долю несоответствующей продукции, характеризуются следующим:

– Нет экструдирования при начале печати.

– Распечатка не прилипает к платформе.

– Недостаточное экструдирование.

Управление качеством процесса послойного синтеза корпусных элементов РЭА позволит повысить качество выпускаемых изделий и сократить издержки на исправление несоответствий при аддитивном производстве.

Заключение

Использование 3D-принтера дельта-конструкции в процессе послойного синтеза объектов позволяет добиться ряда преимуществ по сравнению с традиционной конструкцией принтера. При работе на дельта-установке принципы управления качеством схожи с традиционными принципами управления качеством 3D-печати.

Из всего сказанного можно сделать вывод, что разработанная схема является перспективным решением в области аддитивных технологий и других областях, где применяются роботизированные комплексы.

Библиографический список

1. *Чабаненко, А. В.* Управление качеством корпусных элементов РЭА // Стандарты и качество. 2018. № 2. С. 90–94.
2. *Семенова, Е. Г.* Выявление ключевых показателей качества технологического процесса производства корпуса РЭА на основе FDM / Е. Г. Семенова, А. В. Чабаненко, С. А. Назаревич // Радиопромышленность. М.: ЦНИИ «Электроника». 2017. № 4. С. 141–145.

УДК 338.3

Н. А. Алёшкин*
кандидат технических наук
Г. В. Гетманова*
кандидат экономических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СПОСОБ ОПТИМИЗАЦИИ ЗАТРАТ НА РЕАЛИЗАЦИЮ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Для подготовки калькуляционных материалов, определяющих стоимость изготовления электронных компонент, необходимо иметь адекватную систему прогнозной оценки себестоимости проекта. Традиционные методики определения себестоимости не позволяют сформировать затратную часть проекта с учетом всех неопределенностей. Предложен способ оптимизации затрат, основанный на применении аппарата нечеткой логики.

Указанный способ позволяет использовать нечеткую или неопределенную информацию, благодаря чему повышается обоснованность результатов расчета за счет возможности использования в процессе формирования прогнозной цены всей релевантной информации.

***Ключевые слова**: нечеткая логика, прогнозирование себестоимости, затраты на реализацию проекта, производственный процесс.*

N. A. Aleshkin*
PhD. Tech.
G. V. Getmanova*
PhD. Economic, Associate Professor
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

METHOD OF OPTIMIZATION OF EXPENSES FOR IMPLEMENTATION OF THE PRODUCTION PROCESS FOR THE MANUFACTURE OF AN ELECTRONIC COMPONENT BASED ON THE APPLICATION OF FUZZY LOGIC

In order to prepare the calculation materials that determine the cost of manufacturing electronic components, it is necessary to have an adequate system of forecasting the cost of the project. Traditional methods of cost determination do not allow to form a cost-effective part of the project taking into account all uncertainties. A method of cost optimization based on fuzzy logic is proposed. This method allows the use of fuzzy or uncertain information, and, therefore, increases the validity of the calculation results due to the possibility of using all relevant information in the process of forming the forecast price.

***Keywords:** fuzzy logic, forecasting of cost, the cost of the project, the production process.*

В современных условиях непрерывно повышающихся требований к результативности производственного процесса (ПП) изготовления электронных компонент значительную роль в вопросе принятия решения о привлекательности проекта играет себестоимость его реализации. Особенностями производства электроники являются длительность производственного цикла, наличие кооперационных связей, отсутствие априорной информации об объемах и стоимости покупных и комплектующих изделий (ПКИ) и т. д.

Таким образом, принимаемые управленческие решения носят рискованный характер, что может повлиять на качество технологического процесса и привести к непрогнозируемым экономическим последствиям.

При формировании себестоимости проекта необходимо адекватное представление ориентировочных затрат на реализацию. Производственный процесс изготовления электроники характеризуется не стационарностью показателей по статьям затрат, а неполнотой формального описания технологического цикла. Управление процессами подобного рода является сложнореализуемой в прикладном смысле задачей, поскольку для построения традиционной системы управления необходимо детальное описание планируемых операций по исполнению обязательств, а также уточнение критериев управления, сформированных на базе математического аппарата, оперирующего количественными категориями.

На практике процессом формирования себестоимости занимается инженер-экономист в кооперации с техническим специалистом. Используя опыт, он принимает решения, не имеющие строгого математического описания. Поэтому построение моделей и процедур, приближенных к рассуждениям специалиста, и их последующее использование в системе оптимизации выступает в качестве одного из важнейших направлений модернизации способа формирования себестоимости.

На сегодняшний день широко используются методы прогнозирования себестоимости работ, разработанные в соответствие с Приказом Министерства промышленности и энергетики Российской Федерации от 23 августа 2006 г. № 200 «Об утверждении Порядка определения состава затрат на производство продукции оборонного назначения, поставляемой по государственному оборонному заказу», Приказом Федеральной службы по тарифам от 24 марта 2014 г. № 469-а «Об утверждении формы запроса о прогнозных ценах на продукцию, удовлетворяющую требованиям государственного заказчика, а также форм документов для формирования предложения о прогнозной цене на продукцию, поставляемую по государственному оборонному заказу» и т. д.

Однако существенным недостатком использования указанных нормативных документов является отсутствие актуальной информации о сложившихся зависимостях между экономическими показателями предприятия, его территориальным местоположением, спецификой организации ПП изготовления электроники и техническим уровнем оснащения предприятия.

Одним из направлений совершенствования процесса оптимизации затрат на реализацию ПП изготовления электроники является способ, в основе которого лежит реализация аппарата нечеткого регулирования.

Особый интерес представляет теория нечеткой логики (*Fuzzy Logic*), определяющая современный подход к описанию бизнес-процессов, в которых присутствует неопределенность и неточность исходной информации [1].

Детерминированное описание названных связей, как правило, отсутствует, однако имеется практический опыт управления процессом у инженеров-экономистов. Этот опыт составляет базу экспертных знаний.

Методы, развиваемые в теории нечеткого управления, опираются на математическую теорию нечетких множеств и нечеткую логику, которые позволяют оперировать неопределенной или нечеткой информацией, плохо интерпретируемой в количественных терминах [2].

При управлении процессами, не имеющими точного математического описания, нечеткие системы по сравнению с традиционными имеют более высокие показатели по таким критериям, как быстродействие, устойчивость, помехозащищенность и точность, за счет более адекватного описания реальной среды, в которой они функционируют.

Использование аппарата нечеткой логики привлекательно тем, что определенное вербальное описание некоего процесса, характеризующегося качественными показателями, может быть представлено некоторым множеством лингвистических правил.

Нечеткий регулятор (НР) осуществляет управление по состоянию при построении базы продукционных правил на основе лингвистических переменных, определяющих состояние объекта, и в случае, когда цель управления

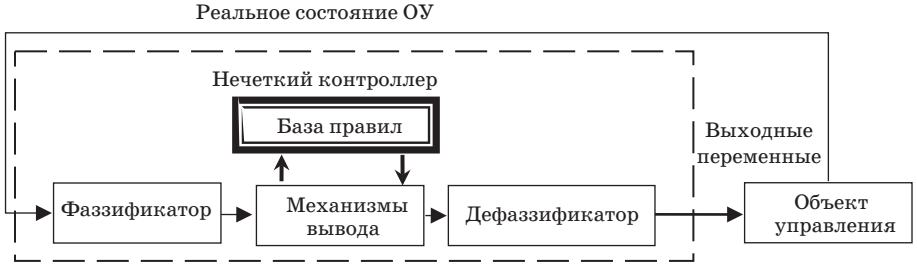


Рис. 1. Система управления с НР и управлением по состоянию

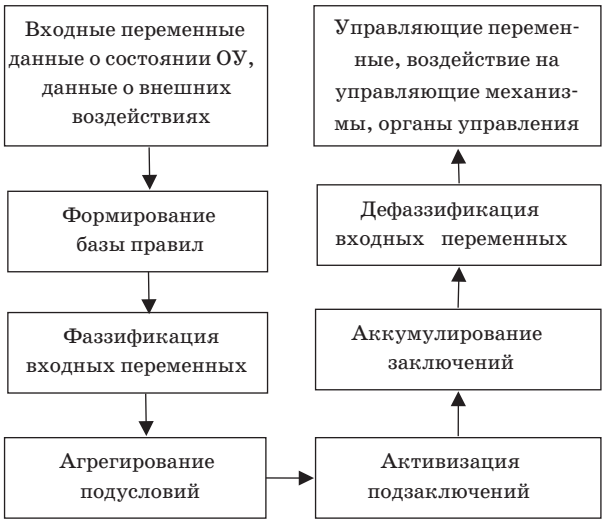


Рис. 2. Принцип формирования нечеткого вывода

в виде желаемого состояния объекта задается экспертом.

Конфигурация системы управления с НР, реализующей управление по состоянию, изображена на рис. 1.

Нечеткий вывод представляет собой процесс получения заключений в нечеткой форме о величине формирования трудоемкости выполнения работ, сформированной с помощью лингвистических переменных, в основе которых лежит информация о текущем состоянии реализации проекта.

При разработке и применении систем нечеткого вывода должны быть соблюдены определенные этапы, которые реализуются на основе положений нечеткой логики (рис. 2) [3, 4].

Чем более обстоятельно и детально составлена база правил, тем менее размытым и более точным будет результат управления.

Необходимо принять во внимание, что определение затрат осуществляется на стадии проработки предложений заказчика, то есть прогнозирование основано на минимальной информации. В частности, информация о проекте может быть ограничена одной или двумя технико-эксплуатационными характеристиками [1]. Очевидно, что производственные условия также не удастся оценить достаточно точно, поэтому для отображения их влияния допустимо использование двух или трех наиболее значимых параметров, влияющих на трудоемкость, а следовательно, определяющих стоимость изготовления, которая станет основным оценочным показателем при управлении ПП.

В себестоимость научно-технической продукции включаются затраты, необходимые для производства продукции и выполнения работ, предусмотренных техническим заданием (программой, методикой, иным аналогичным документом) и договором (заказом) на создание (передачу) научно-технической продукции.

В качестве входных переменных НР, отражающих минимальный набор параметров, с помощью которого возможен процесс оптимизации затрат, были выбраны следующие характеристики процесса:

– затраты на проведение испытаний. В качестве терм-множества лингвистической переменной «затраты на проведение испытаний» будем использовать множество {«да, незначительные», «нет», «да, значительные»};

– материальные затраты (покупные и комплектующие изделия и материалы, используемые в процессе создания научно-технической продукции для обеспечения нормального технологического процесса). В качестве терм-множества лингвистической переменной «материальные затраты» будем использовать множество {«низкие», «средние», «высокие»}.

– трудоемкость выполнения работ (собственные затраты на проект). В качестве терм-множества лингвистической переменной «трудоемкость выполнения работ» будем использовать множество {«низкая», «средняя», «высокая»}.

– затраты на контрагентов (отражаются затраты на привлечение сторонних организаций для выполнения работ и услуг). В качестве терм-множества лингвистической переменной «затраты на контрагентов» будем использовать множество {«низкие», «средние», «высокие»}.

– затраты на командировки (расходы, связанные со служебными командировками). В качестве терм-множества лингвистической переменной «затраты на командировки» будем использовать множество {«да, незначительные», «нет», «да, значительные»}.

В качестве выходной лингвистической переменной будем использовать терм-множество «привлекательность реализации проекта» со значениями {«самая низкая», «низкая», «средняя», «высокая», «самая высокая»}.

Сформированная по указанному принципу база знаний (БЗ) состоит из лингвистических переменных, зависимых от лексических категорий, которыми оперирует человек при осуществлении управляющих функций ПП. Также формируется таблица нечетких отношений, которая отображается в виде лексических категорий, характеризующих приобретенный человеком опыт (см. таблицу).

Преимущество разработанного способа заключается в возможности применения элемен-

Таблица

Описание характеристик процесса формирования себестоимости и управления им в терминах нечеткого управления

Физическая величина	Значение величины	Лингвистическая переменная	Термы лингвистической переменной	Характеристика терма
Входная переменная				
Затраты на проведение испытаний образца изделия, руб.	(−∞; 0)	Затраты на испытания ($Z_{исп}$)	N	Нет
	(0; 1)		Sn	Да, незначительные
	(1; +∞)		P	Да, значительные
Материальные затраты, покупные и комплектующие изделия, руб.	(−∞; 0)	Затраты на ПКИ ($Z_{ПКИ}$)	N	Низкие
	(0; 1)		Z	Средние
	(1; +∞)		P	Высокие
Трудоемкость выполнения работ, собственные и привнесенные, чел/ч	(−∞; 0)	Трудоемкость работ (Tp)	N	Низкая
	(0; 1)		Z	Средняя
	(1; +∞)		P	Высокая
Затраты на контрагентов, соисполнители работ, руб.	(−∞; 0)	Контрагентские затраты ($Z_{к/а}$)	N	Низкие
	(0; 1)		Z	Средние
	(1; +∞)		P	Высокие
Командировочные расходы, руб.	(−∞;0)	Командировочные расходы ($Z_{ком/р}$)	N	Нет
	(0;1)		Sn	Да, незначительные
	(1; +∞)		P	Да, значительные
Выходная переменная				
Привлекательность реализации проекта	0...20	Привлекательность проекта (AtP)	N	Самая низкая
	20...40		SN	Низкая
	40...60		Z	Средняя
	60...80		SP	Высокая
	80...100		P	Самая высокая

тарной БЗ, содержащей простые продукционные правила.

Процедура управления с использованием НР при реализации ПП невозможна без составления базы правил, которая основывается на экспертных мнениях, полученных опытным путем, и результатах мониторинга отслеживаемого процесса.

При формировании себестоимости и группировке статей затрат вручную задача инженера-экономиста заключается в выборе оптимальных значений статей себестоимости с использованием разработанной базы правил.

Сформулируем некоторые правила, описывающие способ оптимизации затрат:

1. IF «$Z_{исп}$» = «N» And «$Z_{ПКИ}$» = «Z» And «Tp» = «P», THEN «AtP» = «SP».

2. IF «$Z_{исп}$» = «Sn» And «$Z_{ПКИ}$» = «Z» And «$Z_{к/а}$» = («N» ИЛИ «Z»), THEN «AtP» = «Sp».

3. IF «$Z_{исп}$» = «P» And «$Z_{ПКИ}$» = «P» And «Tp» =(«N» ИЛИ «Z»), THEN «AtP» = «SN».

4. IF «$Z_{ПКИ}$» = «P» And «$Z_{ком/р}$» = «P» And «$Z_{к/а}$» = «P»,And «Tp» = «N» THEN «AtP» = «N».

5. IF «$Z_{ПКИ}$» = «N» And «$Z_{ком/р}$» = «Sn» And «Tp» = «P», THEN «AtP» = «P»,

где «$Z_{ПКИ}$», «$Z_{исп}$», «$Z_{к/а}$» и «$Z_{ком/р}$», «AtP», «Tp» – лингвистические переменные процесса; «P», «N», «Sn», «Z», «Sp», «P» – термы лингвистических переменных.

Анализ результативности предложенных решений и определение условий их наиболее эффективного применения выполнены с использованием интерактивной среды для программирования, расчетов и визуализации *Matlab* компании *MathworksInc.*

Реализация данного способа в рамках системы нечеткого регулирования позволяет не только решать проблему с отсутствием априорной информации для построения аналитической зависимости, но и учитывать при прогнозировании качественные факторы, отражающие технико-экономические условия производства.

Библиографический список

1. *Алехин, М. Ю.* Прогнозирование себестоимости постройки судна с использованием аппарата теории нечетких множеств / М. Ю. Алехин, В. В. Раев // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2012. № (2). С. 74–80.
2. *Алёшкин, Н. А.* Совершенствование систем автоматического регулирования климатических параметров технологического процесса при производстве микроэлектроники в условиях возмущений / Н. А. Алёшкин, Е. Г. Семенова // Вопросы радиоэлектроники: серия «Радиолокационная техника». 2016. Вып. 6. С. 57–61.
3. *Алиев, Р. А.* Управление производством при нечеткой исходной информации / Р. А. Алиев, А. Э. Церковный, Г. А. Мамедов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 240 с.
4. *Леоненков, А. В.* Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.

УДК 004.942

Я. А. Щеников
кандидат технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

В статье рассматриваются вопросы цифровой трансформации современного образовательного процесса с использованием таких элементов, как большие данные и цифровой двойник. Приведен пример использования сетей Байеса для построения и анализа зависимостей между дисциплинами.

***Ключевые слова**: цифровая трансформация, цифровая экономика, ситуационное управление образовательным процессом, большие данные, визуальный анализ данных, байесовские сети.*

Y. A. Shchenikov
PhD. Tech., Associate Professor
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

NEW OPPORTUNITIES IN DIGITAL TRANSFORMATION OF THE EDUCATIONAL PROCESS

The article deals with the issues of digital transformation of the modern educational process with the use of such elements as big data and digital twin. An example of using Bayesian networks for building and analyzing dependencies between disciplines is given.

***Keywords:** digital transformation, digital economy, situational management of the educational process, big data, visual data analysis, Bayesian networks.*

Введение

Цифровая экономика вместе с элементами Индустрии 4.0 постепенно приходит в нашу жизнь. Правительства государств, руководители предприятий и организаций осознают необходимость перемен и выделяют ресурсы на цифровую трансформацию. Неизбежна цифровая трансформация и в образовательном процессе. Можно сказать, что информатизация российских вузов уже произошла: широко используются такие элементы информатизации, как онлайн-тестирование, рабочие кабинеты обучающихся и профессорско-преподавательского состава, виртуализация [1]. Следующий этап – цифровизация образовательного процесса.

Для внедрения элементов цифровой экономики необходимы высококвалифицированные кадры, и необходимы уже сегодня [2]. Один из лучших способов подготовки «цифровых» кадров – это погружение их в цифровую экосистему еще в процессе обучения.

Цифровая трансформация востребована не только в промышленности. Внедрение элементов цифровой экономики и Индустрии 4.0 дает шанс образовательным учреждениям хотя бы частично решить ряд следующих проблем:

– Современные российские (и не только российские) студенты не сильно мотивированы и стимулированы к активному участию в образовательном процессе [3].

– Проблема тьюторства. В вузах РФ практически нет тьюторов в том смысле, в котором это понимается в болонской системе. Но есть надежда, что если не сегодня, то уже в ближайшем будущем цифровой тьютор будет в состоянии заменить тьютора-человека.

– Практически не используются возможности современных информационных технологий для реализации механизмов ситуационного управления образовательным процессом.

Предпосылки цифровой трансформации образовательного процесса

Заинтересованными сторонами цифровой трансформации образовательного процесса являются государство, работодатели, профессор-

ско-преподавательский состав вузов, деканаты вузов, обучающиеся. Цифровая кафедра должна стать инструментом уже не социализации, а цифровизации студента, давать ему знания и навыки для выживания в условиях будущей цифровой экономики.

Возможно ли использование элементов Индустрии 4.0 и цифровой экономики в образовательном процессе? Успешное внедрение любой инновации возможно только тогда, когда потребности потребителей инновации встречаются с возможностями эти потребности удовлетворить. Рассмотрим предпосылки к цифровой трансформации образовательного процесса:

– рост вычислительной мощи компьютеров и объемов памяти;

– цифровые технологии доступны широкому кругу потребителей;

– наличие в учебных заведениях достаточно большого количества преподавателей, владеющих культурой работы с информацией в цифровом виде;

– все вузы имеют доступ в Интернет;

– все обучающие, преподаватели и другие сотрудники вуза также имеют доступ в Интернет;

– стоимость услуг по интеллектуальному анализу больших данных постоянно снижается ввиду роста конкуренции в этой сфере;

– наличие у вузов готовой инфраструктуры и персонала для цифровой трансформации: серверы, выпускники-программисты, выпускники-электронщики;

– проблемы профессорско-преподавательского состава, связанные с возрастающей педагогической нагрузкой при одновременном повышении требований к качеству образовательного процесса.

Возможности цифровой трансформации образовательного процесса:

– Реализация цикла PDCA: для обучающегося это минимизация отклонения от образовательной траектории, для профессорско-преподавательского состава – минимизация отклонения от требований образовательных стандартов.

– Выявление точек бифуркации – определенные периоды обучения, недополучение в которые важных знаний и навыков может привести к сложностям изучения специальных дисциплин.

– Выявление пробелов в знаниях у обучающихся и запуск механизмов по восполнению этих пробелов, например в виде заранее разработанных индивидуальных заданий, тестов.

– Проверка остаточных знаний обучающихся в фоновом режиме с последующей коррекцией образовательной траектории обучающихся путем выдачи им дополнительных индивидуальных заданий.

– Привитие обучающимся и профессорско-преподавательскому составу культуры работы с данными.

– Замена тьютора-человека никогда не устающим цифровым тьютором.

– Прогноз успеваемости обучающегося по будущим дисциплинам на основании информации об успехах, достигнутых на текущем и прошлых курсах обучения.

– Выявление предрасположенности обучающихся к тому или иному виду деятельности с последующим составлением на него электронного портфолио, которое будет полезным для будущего работодателя.

– Автоматизированный контроль прохождения инструктажа по технике безопасности участниками образовательного процесса.

– Анализ факторов, влияющих на качество образовательного процесса, поиск скрытых закономерностей с использованием современных инструментов, таких как облачная аналитика.

Элементы цифровой экономики в образовательном процессе

Основным элементом цифровой экономики, который является ключевым при цифровой трансформации образовательного процесса, являются большие данные (*Big Data*). В вузе это база данных оценок обучающихся. Инструменты аналитики больших данных должны не только определять несоответствия в виде недостаточных баллов за успеваемость, но и выявлять, знаний по каким дисциплинам не хватило обучающемуся, чтобы получить оценку «отлично».

Цифровизация учебного процесса позволяет более глубоко и более объективно исследовать взаимосвязи между дисциплинами учебного цикла, основываясь, например, на математическом аппарате сетей Байеса. В качестве примера рассмотрим байесовскую сеть, фрагмент которой изображен на рис. 1. Данная байесовская сеть по сути представляет собой классификатор возможных ситуаций, которые могут произойти с обучающимся, поступившим на определенное направление подготовки в вуз.

Помимо учебных дисциплин на рис. 1 также указаны и связи между этими дисциплинами. Таким образом, информация о недостаточно хороших оценках, полученных на одном из курсов, позволяет сделать прогноз оценок, которые будут получены на последующих курсах обучения.

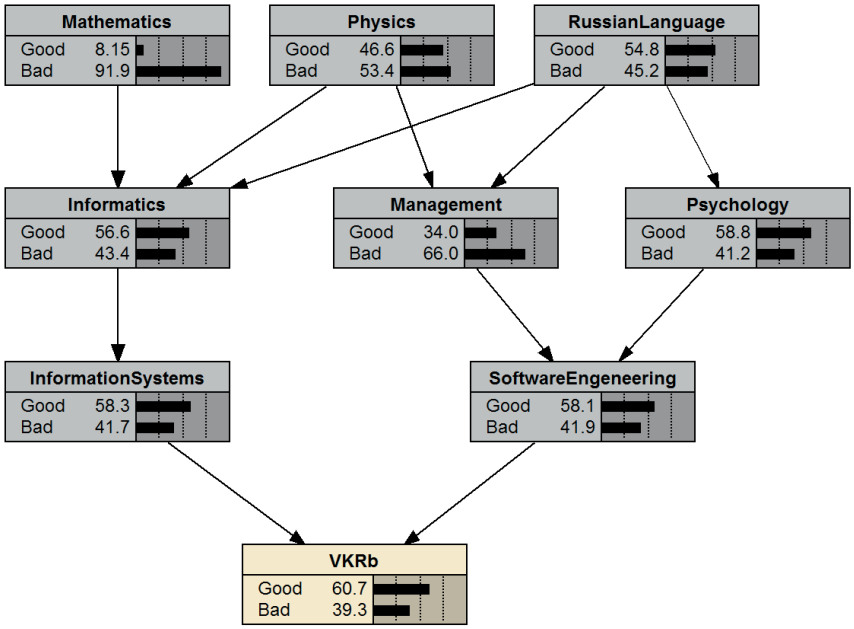


Рис. 1. Фрагмент байесовской сети, реализованный в программе Netica

Своевременно сделанный прогноз дает возможность вовремя скорректировать образовательную траекторию обучающегося, например путем выдачи ему индивидуальных заданий, выполнение которых позволит ликвидировать или минимизировать пробелы в знаниях, требующихся для освоения дисциплин последующих курсов. Крайне желательно, чтобы выдача этих заданий обучающемуся была автоматизирована путем добавления их в электронный рабочий кабинет обучающегося.

Инструментальные средства для реализации цифровой трансформации

Функционал таких когнитивных систем, как IBM *Watson*, *Microsoft Azure*, *Yandex Data Factory* и других аналитических облачных сервисов, позволяет реализовывать следующие возможности: загрузка данных из различных источников, выявление зависимостей и скрытых закономерностей, интеллектуальный классификатор ситуаций, корреляционный анализ, прогнозирование, методы визуального анализа [4, 5]. Современные методы визуализации, ориентированные на пиксели, позволяют отображать одновременно в виде двухмерных или трехмерных образов успеваемость обучающихся всех курсов на кафедре (рис. 2).

Этапы цифровой трансформации

Для цифровой трансформации кафедры должен быть разработан комплекс организацион-

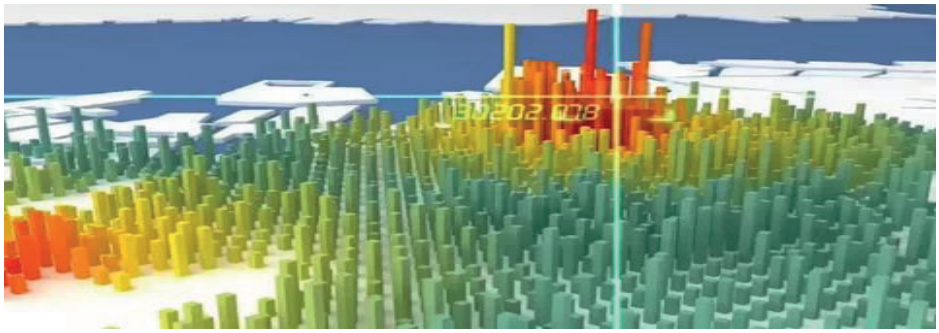


Рис. 2. Разрешение современных мониторов дает возможность визуализировать успеваемость обучающихся и использовать методы Visual Mining, ориентированные на пиксели

Рис. 3. Концептуальная модель цифровизации образовательного процесса

но-технических решений, включающий в себя следующие задачи:

– разработка критериев результативности для оценки качества цифровой трансформации образовательного процесса;

– разработка системы мотивации обучающихся и профессорско-преподавательского состава к использованию элементов цифровизации образовательного процесса с применением когнитивных образовательных технологий;

– разработка дополнительных заданий для коррекции образовательной траектории обучающегося;

– обеспечение соответствующего уровня информатизации учебного заведения, причем важно не столько наличие современных инструментальных средств, сколько умение участников образовательного процесса ими пользоваться;

– построение зависимостей между модулями дисциплин учебного плана (рис. 3);

– создание «цифровых двойников» обучающихся и преподавателей: страничка пользователя в социальной сети – по сути «цифровой двойник» пользователя, поэтому математический аппарат, созданный для анализа социальных сетей, может успешно использоваться и для «цифрового двойника» обучающегося или преподавателя;

– разработка интеллектуального классификатора, необходимого для реализации ситуационного управления образовательным процессом.

Возможные риски, связанные с процессом цифровой трансформации образовательного процесса:

– дистанцирование студента от преподавателя;

Таблица

Уровни зрелости документооборота [6]

Уровень	Название уровня	Процессы	Особенности
1	Нерегламентированность	Ручные процессы: – бумажные носители – ручной ввод – низкая защищенность	Преобладают высокие расходы, возникают проблемы с безопасностью. Данные для рабочих процессов вводятся вручную, то есть неэффективно
2	Ситуативность	Базовые процессы: – статичность – структурированность – ручное извлечение данных	Электронные архивы ускоряют поиск архивированных данных и частично сокращают расходы
3	Воспроизводимость	Интеллектуальные процессы: – интеллектуальное сканирование/ввод – структурированные и неструктурированные процессы – улучшенные контроль и безопасность	Перевод документооборота в цифровой формат повышает гибкость работы. Происходит модернизация процессов
4	Управляемость	Связанные процессы: – 3-я технологическая платформа – новые связи – устранены барьеры между департаментами	Обеспечивается конкурентное преимущество и, как следствие, долгосрочная финансовая выгода
5	Оптимизация	Комплексные процессы: – автоматизация всех подразделений – активное использование передовых технологий – минимальное использование ручного труда	Обеспечивается максимальная эффективность процессов во всех подразделениях

– падение посещаемости занятий и, как следствие, появление у обучающихся дополнительного свободного времени, которое не всегда используется с пользой;

– рост конкуренции на рынке дистанционного обучения;

– киберриски;

– недостаточный уровень зрелости документооборота образовательного учреждения (см. таблицу).

Заключение

Цифровую трансформацию необходимо осуществлять как можно скорее, поскольку опыт внедрения элементов Индустрии 4.0 в промышленности свидетельствует о том, что для этого требуется не менее трех лет, из них два года требуется для сбора больших данных [7].

Ожидаемые результаты цифровой трансформации образовательного учреждения: повышение эффективности и результативности образовательного процесса, реализация цикла PDCA, реализация механизмов ситуационного управления образовательным процессом, повышение конкурентоспособности образовательного учреждения и как следствие всего этого – успешная реализация программы «Цифровая экономика Российской Федерации».

Библиографический список

1. *Тульчинский, Г. Л.* Цифровая трансформация образования: вызовы высшей школе // Философские науки. 2017. № 6. С. 121–136.
2. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации». Распоряжение правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р // Правительство России. URL: http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf.
3. *Калашникова, В. Ю.* Мотивация учебной деятельности студентов вузов различных стран / В. Ю. Калашникова, Г. Р. Шагивалеева // Теория и практика образования в современном мире: матер. VII Междунар. науч. конф. СПб.: Свое издательство, 2015. С. 43–46.
4. *Барсегян, А. А.* Анализ данных и процессов: учеб. пособие / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, И. И. Холод, М. Д. Тесс, С. И. Елизаров. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 512 с.
5. IBM Watson. URL: https://www.ibm.com/watson/.
6. *Беклемишев, А.* Цифровая трансформация документооборота: в поисках лучших практик // Журнал о системах электронного документооборота (СЭД). URL: https://idc-cema.com/dwn/SF_229478/01_andrew_beklemishev.pdf.
7. *Рот, А.* Внедрение и развитие Индустрии 4.0. Основы, моделирование и примеры из практики. М.: Техносфера, 2017. 294 с.

УДК 658.528

О. А. Богдашева*
магистрант
Я. А. Щеников*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОСОБЕННОСТИ СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ ТЯЖЕЛОГО ТРАНСПОРТНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЧЕТВЕРТОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ РЕВОЛЮЦИИ

В данной статье рассматриваются проблемы идентификации и оценки новых рисков предприятий машиностроительной отрасли, предложены методы ситуационного управления, учитывающие особенности работы данных предприятий, рассмотрены инструментальные средства, позволяющие реализовать предложенные методы ситуационного управления.

***Ключевые слова**: ситуационное управление, Индустрия 4.0, транспортное машиностроение, четвертая промышленная революция, анализ влияния на бизнес.*

О. А. Богдашева*
Postgraduate Student
Я. А. Щеников*
PhD. Tech., Associate Professor
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

FEATURES OF THE SITUATIONAL ENTERPRISE MANAGEMENT OF HEAVY TRANSPORT ENGINEERING IN TERMS OF THE FOURTH INDUSTRIAL REVOLUTION

The relevance of the article is caused by the need to prepare enterprises for changes caused by the transition of the industry of the Russian Federation and the world to work in the conditions of the fourth technological revolution, the so-called «industry 4.0». This article discusses the problems of identification and assessment of new risks of machine-building enterprises, proposed methods of situational management, taking into account the peculiarities of these enterprises, considered tools to implement the proposed methods of situational management.

***Keywords:** situational management, industry 4.0, transport engineering, the fourth industrial revolution, business impact analysis.*

Введение

Одной из основных задач в российской экономике является повышение уровня конкурентоспособности и эффективности российских предприятий. Ее решение будет способствовать повышению качества производственных процессов, прибыли, экономическому росту государства.

Термины «Четвертая промышленная революция» и «Индустрия 4.0» происходят от проекта в высокотехнологичной стратегии правительства Германии, предполагающего инвестирование 40 млрд евро в цифровизацию промышленного сектора каждый год до 2020 года.

Нормативной базой для внедрения элементов концепции Индустрия 4.0 и цифровой экономики являются «Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации» и Распоряжение правительства РФ №1632-р от 28 июля 2017 г. об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации» [1].

Объединение виртуального и физического миров дало начало такому понятию, как «умная фабрика» (*Smart Factory*), интегрирующему следующие элементы: искусственный интеллект, машинное обучение, автоматизация работы со знаниями и взаимодействие «машина – машина» с производственным процессом.

«Умная фабрика» кардинально изменяет то, как продукты будут разрабатываться, производиться и доставляться потребителям, при этом благодаря ей улучшится безопасность работников и защита окружающей среды. Совершенствование способов обмена данными между машинами и другими объектами уже приводит к тому, что процесс принятия решений переходит от людей к техническим системам, и это означает, что производство становится «умнее».

Ключевые технологии Индустрии 4.0:

– автоматизация, робототехника и автономная мобильность;

– взаимодействие «машина – машина», обеспечиваемое промышленным Интернетом вещей;

– большие данные;

– оптимизированные промышленные процессы: меньшее время простоя из-за обслуживания, меньшее количество отключений, значительное снижение энергопотребления;

– дополненная реальность: возможность улучшения процессов обслуживания и диагностики неисправностей, обучение работы с оборудованием с использованием средств виртуальной реальности;

– аддитивное производство.

Идентификация рисков предприятий транспортного машиностроения в условиях четвертой технологической революции

Традиционно руководящим документом для оценки рисков является стандарт ГОСТ 31000 [2]. В условиях Индустрии 4.0 к традиционным рискам добавляются еще и новые, выдвигаются новые требования к методам их оценки.

Риски, связанные с человеческим фактором

Риск изменений требований к труду – риск того, что недостаточное присутствие в рабочей силе навыков и опыта может препятствовать переходу к новой экономике. Моделирование и анализ данных, кибербезопасность и конфиденциальность данных, анализ больших данных в контексте поведенческой экономики потребуют высококвалифицированных математиков, программистов, инженеров, а также экономистов и психологов с опытом вычислительных навыков для интерпретации результатов.

Риск нехватки рабочих мест – рост неравенства в доходах и повышение социальной напряженности возможно, если труд, замещенный автоматизацией, не будет востребован. Изменение структуры спроса на рабочую силу также может иметь важные социальные последствия из-за того, что многие рабочие места были устранены по мере их автоматизации.

Риск внутреннего саботажа может привести к серьезным и продолжительным простоям с большими финансовыми потерями для промышленности и общества.

Религиозный риск – возможная негативная реакция религиозных работников при попытке присвоения им каких-либо номеров, например при подключении RFID-метки работника к промышленному Интернету.

Риск появления новых профессиональных заболеваний – возможно появление новых профессиональных заболеваний, характерных только для предприятий Индустрии 4.0 [3].

Риски, связанные с потерей информации

Риск утечки ценной коммерческой информации – информация о клиентах, интеллектуальная собственность, конструкторская документация, данные о производительности – все это необходимо будет эффективно защищать таким образом, чтобы иметь возможность свободно использовать обмен данных внутри бизнеса.

Киберриск – кибератаки могут остановить производство или стать причиной дефектов изделий. Любой системный сбой, в том числе из-за кибератаки, может привести к большим убыткам из-за цепной реакции, так как убытки могут затрагивать не только систему, находящуюся под атакой, но и другие зависимые компании в цепях поставок и распределения.

Риск сбоя программного обеспечения (ПО) – компании уязвимы для сбоев в любом месте цепочки добавленной стоимости: от производителя продукта до клиентов, от субподрядчиков до облачных и внешних сервисов. Это приводит к значительным зависимостям между всеми сторонами, вовлеченными в производство и жизненный цикл продукта, независимо от роли и размера участника.

Риск случайного повреждения данных и/или их удаление – может привести к серьезным и продолжительным простоям с большими финансовыми потерями для промышленности и общества.

Прочие риски

Риск большого сбоя из-за остановки производственной деятельности – высокая степень взаимосвязанности предприятий Индустрии 4.0 повышает чувствительность всей цепочки создания ценности к сбоям, например, в цепи поставок. Частоту нарушений и простоев в работе предприятий можно снизить, используя постоянный мониторинг производительности,

обеспечивая непрерывную информационную обратную связь, повышая устойчивость и гибкость цепи поставок к изменениям, находящимся вне контроля «умной фабрики».

Риск ошибочного планирования – ошибки и упущения, допущенные при планировании и строительстве «умной фабрики», могут привести к тяжелым авариям или убыткам, длительному простою предприятия. В качестве примера данного риска можно рассматривать, например, повышенную уязвимость к повреждениям или разрушениям «умной фабрики» в результате стихийных бедствий или других катаклизмов.

Оценка рисков машиностроительного предприятия в условиях четвертой промышленной революции

Цифровая трансформация выдвигает новые требования к методам оценки рисков. Общей идеей, использующейся при оценки рисков, является нахождение вероятности возникновения риска и оценки возможного ущерба от него [2]. Анализ влияния на бизнес – деятельность по определению критичных бизнес-функций и их зависимости, выполняемая в рамках процесса управления непрерывностью бизнеса. Зависимости могут включать в себя подрядчиков, людей, другие бизнес-процессы, ИТ-услуги и т. д. [4, 5]. В рамках анализа влияния на бизнес широко используется методика идентификации рисков BIA (*Business Impact Analysis*) (табл. 1–3).

Расшифровка терминов, использующихся в табл. 1–3 [6]:

– MTD (*Maximum Tolerable Downtime*) – максимально приемлемый период нарушения. Время, по истечении которого неблагоприятные последствия, возникшие в результате необеспечения поставок продукции/услуг или невыполнения деятельности, становятся неприемлемыми.

– RTO (*Recovery Time Objective*) – время, доступное для восстановления работоспособности систем и ресурсов, необходимых для выполнения критически важных видов деятельности, включая персонал и ИТ-сервисы, до нормального уровня.

– RPO (*Recovery Point Objective*) – относительная точка во времени (в прошлом), возврат на которую должен быть произведен в случае восстановления системы, иными словами, этот показатель определяет объем данных, представленный в виде временного интервала, утеря которого допустима в случае прерывания деятельности.

Процесс управления непрерывностью бизнеса включает в себя также необходимость разработки плана обеспечения непрерывности бизнеса (*Business Continuity Plan*, BCP), представляющий собой набор документированных процедур и информации и позволяющий в случае возникновения инцидента или прерывания бизнеса обеспечить продолжение выполнения организацией критически важных для нее видов деятельности на установленном приемлемом уровне (табл. 4) [7].

Цифровизация в условиях Индустрии 4.0 выдвигает новые требования к методам идентификации и оценки рисков без участия экспертов. Наиболее серьезными последствиями для предприятия в условиях Индустрии 4.0 обладают риски, связанные с забастовками и потерей энергоснабжения. Вторыми по значимости являются киберриски.

В рамках Индустрии 4.0 благодаря использованию коммуникационных и рабочих данных, машины будут самонастраиваться, самокали-

Таблица 1

Оценка рисков Индустрии 4.0, связанных с человеческим фактором, с помощью методики BIA

Критическое событие для бизнес-процесса/актива		Потеря сотрудников компании до 30%	Забастовка	Саботаж
Задействован внешний заказчик		Нет	Нет	Нет
Актив передан (*Outsourced*) внешнему подрядчику		Нет	Нет	Нет
Количество затронутых пользователей		Все	Все	Все
Максимально приемлемый период прерывания бизнеса MTD, ч		3 дня	2–3 ч	24 ч
Степень воздействия: 0 – без воздействия 1 – незначительное воздействие 2 – затрудняет бизнес-процессы 3 – серьезное воздействие 4 – бизнес-процессы прерваны	1 ч	2	4	3
	2 ч	3	4	3
	4 ч	3	4	4
	8 ч	3	4	4
	1 неделя	4	4	4
Приоритет восстановления		Средний	Высокий	Высокий

Таблица 2

Оценка киберрисков Индустрии 4.0 с помощью методики BIA

Критическое событие для бизнес-процесса/актива		Кибератака и последующий системный сбой	Сбой ПО	Случайное повреждение данных
Задействован внешний заказчик		Нет	Нет	Нет
Актив передан (*Outsourced*) внешнему подрядчику		Да	Да	Нет
Количество затронутых пользователей		Все	Все	Все
Максимально приемлемый период прерывания бизнеса MTD, ч		2–3 ч	2–3 ч	2–3 ч
Степень воздействия: 0 – без воздействия 1 – незначительное воздействие 2 – затрудняет бизнес-процессы 3 – серьезное воздействие 4 – бизнес-процессы прерваны	1 ч	3	2	3
	2 ч	3	2	3
	4 ч	4	3	4
	8 ч	4	4	4
	1 неделя	4	4	4
Приоритет восстановления		Высокий	Высокий	Средний

Таблица 3

Оценка прочих рисков Индустрии 4.0 с помощью методики BIA

Критическое событие для бизнес-процесса/актива		Стихийные бедствия или другие катаклизмы	Потеря энергоснабжения	Потеря дата-центра (или связи с дата-центром)	Риск большого сбоя из-за остановки производственной деятельности
Задействован внешний заказчик		Да	Нет	Нет	Нет
Актив передан (*Outsourced*) внешнему подрядчику		Нет	Нет	Да	Нет
Количество затронутых пользователей		Все	Все	Все	Все
Максимально приемлемый период прерывания бизнеса MTD, ч		3–4 дня	1 ч	1 ч	1 ч
Степень воздействия: 0 – без воздействия 1 – незначительное воздействие 2 – затрудняет бизнес-процессы 3 – серьезное воздействие 4 – бизнес-процессы прерваны	1 ч	2	4	1	1
	2 ч	2	4	1	2
	4 ч	4	4	2	3
	8 ч	4	4	2	4
	1 неделя	4	4	3	4
Приоритет восстановления		Высокий	Высокий	Средний	Высокий

Таблица 4

Структура плана обеспечения непрерывности бизнеса

Элемент плана обеспечения непрерывности бизнеса	Описание элемента плана обеспечения непрерывности бизнеса
Основные положения плана обеспечения непрерывности бизнеса	Актуальность, основные цели и задачи, способы решения
Оценка воздействия на бизнес	Анализ возможных угроз непрерывности бизнеса компании. Разработка возможных сценариев чрезвычайных ситуаций. Оценка уязвимости инфраструктуры компании от различных угроз, оценка возможного ущерба в случае чрезвычайных ситуаций, оценка остаточных рисков
Деятельность компании в чрезвычайной ситуации	Разработка мероприятий, обеспечивающих непрерывность деятельности компании в чрезвычайной ситуации и восстановление ее нормального функционирования: оценка опасного события, объявление чрезвычайной ситуации, оповещение необходимого круга лиц, ввод в действие плана
Поддержание готовности к обеспечению непрерывности бизнеса	Разработка мероприятий, обеспечивающих поддержание готовности к обеспечению непрерывности бизнеса: периодический аудит плана BCP; составление списка адресов и процедуры рассылки плана; обучение и проверка готовности сотрудников к действиям, необходимым для восстановления деятельности компании после происшествия; резервное копирование критически важных данных и приложений

Окончание табл. 4

Элемент плана обеспечения непрерывности бизнеса	Описание элемента плана обеспечения непрерывности бизнеса
Информационное обеспечение	Информация о приоритетных бизнес-процессах компании; технических средствах, ПО, средствах связи, документах, офисном оборудовании, персонале, адреса и телефоны лиц, которых необходимо оповестить в случае возникновения чрезвычайной ситуации. Учетная информация о техническом, программном и другом обеспечении, необходимом для восстановления бизнеса компании в случае чрезвычайной ситуации. Вспомогательная информация: планы и схемы, маршруты перевозок, адреса и т. п. Описание для сотрудников компании функций и обязанностей, детальных пошаговых процедур, обеспечивающих четкое выполнение всех предусмотренных мер в случае возникновения непредвиденных обстоятельств. Требуемые сроки восстановления деятельности компании в зависимости от типа возникшей чрезвычайной ситуации, смета расходов и источники финансирования обеспечения непрерывности бизнеса
Техническое обеспечение	Создание, поддержка и эксплуатация аппаратно-программных средств и резервного помещения для обеспечения непрерывности бизнеса
Организационное обеспечение	Обеспечение механизмов анализа и управления рисками; антикризисного управления; реагирования на инциденты; восстановления; обеспечения работы в резервном помещении; поддержки руководства

броваться и иметь способность выполнять самостоятельную диагностику сбоев и собственной производительности. Методы же прогнозирования технического обслуживания призваны помочь определить состояние оборудования без необходимости его остановки, чтобы предсказать, когда должно проводиться техническое обслуживание. Эти методы основаны на мониторинге используемого оборудования в режиме реального времени. Риски, связанные с внезапным выходом из строя оборудования, минимизируются путем систематического обслуживания.

Согласно традиционным протоколам профилактического обслуживания, плановое техническое обслуживание выполняется на основе рекомендаций, предоставленных изготовителем оригинального оборудования. Поскольку многие машины имеют компоненты с разным сроком службы и разными интервалами технического обслуживания, это стимулирует отрасль к разработке прогностических методов обслуживания для продления интервалов технического обслуживания.

Поскольку простои в обслуживании подразумевают сокращение или приостановку производства, обслуживание, основанное на прогнозе, может помочь сократить расходы. Для обеспечения прогностического обслуживания промышленность использует различные методы измерения, такие как вибрационные, ультразвуковые и акустические измерения, позволяющие реализовать раннее обнаружение медленно развивающихся неисправностей.

Диагностика неисправностей оборудования во многом похожа на задачу распознавания образов, с которой прекрасно справляются нейронные сети. Они обладают интеллектуальными свойствами, умеют делать прогнозы, поэтому их использование позволяет достичь более высоких результатов обнаружения неисправностей оборудования по сравнению с другими системами диагностики.

Состояние любого элемента оборудования характеризуется большим количеством параметров состояния, значения которых можно получить, используя имеющиеся на оборудовании средства измерения, или же путем проведения на работающем или отключенном электрооборудовании дополнительных испытаний [8].

Искусственные нейронные сети (ИНС) позволяют определять состояние, в котором в данный момент находится производственное оборудование. Это осуществляется за счет свойства нейронных сетей классифицировать поступающую на их вход информацию о состоянии электрических и механических узлов оборудования. Искусственная нейронная сеть относит это состояние к одному из классов состояний: исправное или неисправное с дефектом определенного типа.

Экспертная система диагностики состояния сварочного робота с использованием ИНС состоит из датчиков, контролирующих состояние его различных электрических и механических параметров: ток, напряжение, скорость, вибрация, температура. При обучении ИНС эта информация в виде числового вектора подается на ее вход, при этом каждому входному вектору ставится в соответствие выходной вектор – распознаваемый режим функционирования – дво-

Таблица 5

Пример обучающей выборки для системы диагностики сварочного робота с помощью ИНС

Информация с датчиков электрических и механических параметров					Выходные данные нейронной сети				
X_1	X_2	Y_1	Y_2	Y_3	OUT_1	OUT_2	OUT_3	OUT_4	OUT_5
Ток, А	Напряжение, В	Скорость	Вибрация	Температура	Норма	Механическая неисправность класса 1	Механическая неисправность класса 2	Электрическая неисправность класса 3	Электрическая неисправность класса 4
3	220	3000	1	36	1	0	0	0	0
10	160	900	16	52	0	1	0	0	0
12	170	2400	5	45	0	0	1	0	0
25	190	0	0	65	0	0	0	1	0
0	230	0	0	25	0	0	0	0	1

ичный вектор, в котором «1» соответствует наличию неисправности, а «0» – ее отсутствию (табл. 5).

Для обучения ИНС используется скрипт, реализованный в системе компьютерной математики *Matlab* 6.5 (рис. 1). Результаты верификации процесса распознавания нейронной сетью неисправностей приведены на рис. 2–6.

Обученная искусственная нейронная сеть на основе данных мониторинга производственного оборудования по исходной (входной) информации может с высокой степенью точности предсказать появление проблем в его работе и оценить степень его технического состояния, тем самым своевременно вывести оборудование из зоны опасного режима эксплуатации для его профилактического обслуживания, реализуя таким образом классификатор – один из основных элементов ситуационного управления.

Рассматриваемые далее инструментальные средства позволяют осуществлять удаленный автоматизированный сбор информации с оборудования о возникающих ошибках, состоянии узлов, параметрах работы и внешней среды, а также осуществляют диагностику оборудования и по ее результатам формируют план ремонтных работ.

```
p=[3 220 3000 1 36; 10 160 900 16 52; 12 170 2400 5 45; 25 190 0 0
65; 0 230 0 0 25]'
t=[1 0 0 0 0; 0 1 0 0 0; 0 0 1 0 0; 0 0 0 1 0; 0 0 0 0 1]'
[R,Q]=size(p);
[S2,Q]=size(t);
S1=2000;
net=newff(minmax(p), [S1 S2], {'logsig' 'logsig'}, 'traingdx' );
net.LW{2,1}=net.LW{2,1}*0.01
net.b{2}=net.b{2}*0.01
net.performFcn='sse';
net.trainParam.goal=0.01;
net.trainParam.show=20;
net.trainParam.epochs=350;
net.trainParam.mc=0.95;
[net,tr]=train(net,p,t);
```

Рис. 1. Листинг программы Matlab для создания и обучения нейронной сети

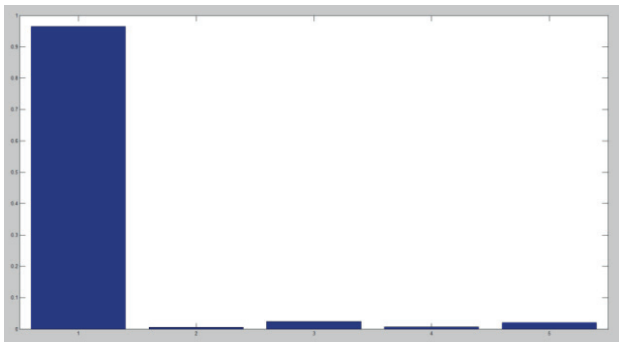


Рис. 2. Нормальный режим работы электродвигателя: a=sim(net, [3 220 3000 1 36]'); y=[1:5]; bar(y,a)

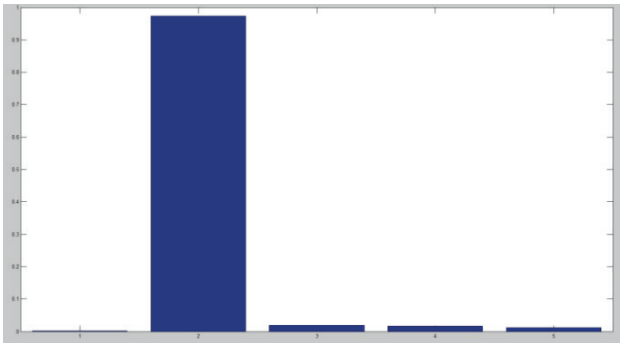


Рис. 3. Механическая неисправность класса 1: a=sim(net, [10 160 900 16 52]'); y=[1:5]; bar(y,a)

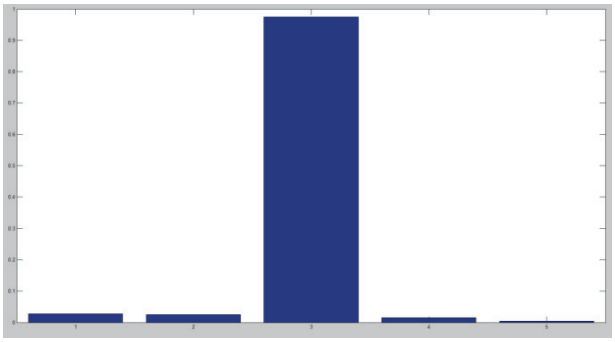


Рис. 4. Механическая неисправность класса 2: a=sim(net, [12 170 2400 5 45]'); y=[1:5]; bar(y,a)

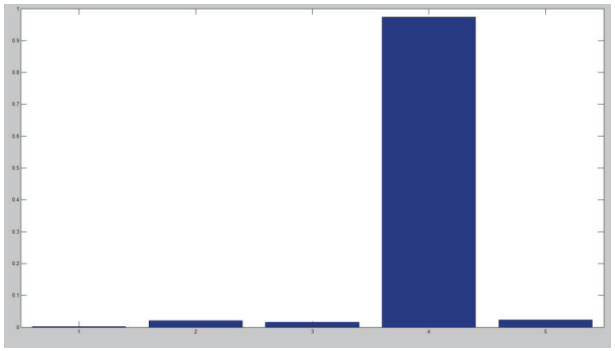


Рис. 5. Электрическая неисправность класса 3: a=sim(net, [25 190 0 0 65]'); y=[1:5]; bar(y,a)

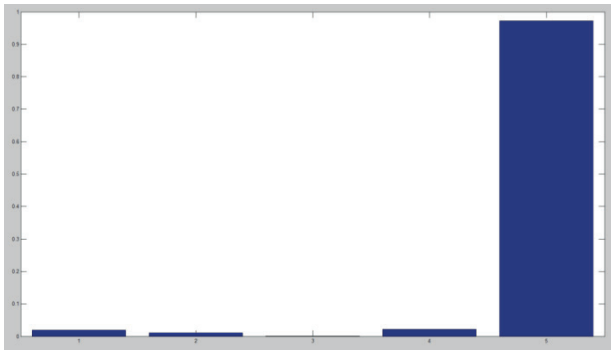


Рис. 6. Электрическая неисправность класса 4: a=sim(net, [0 230 0 0 25]'); y=[1:5]; bar(y,a)

Программные продукты и сервисы Siemens в области цифрового производства

Lifecycle Analytics – аналитический программный продукт для анализа жизненного цикла с целью удаленного технического обслуживания по текущему состоянию. Программное обеспечение позволяет изготовителям осуществлять доступ к эксплуатационным данным производственного оборудования, чтобы повышать качество выпускаемой продукции. Программный продукт *Teamcenter* является основой для всех программ и инструментов комплекта ПО цифрового предприятия, а облачная платформа для промышленности *Siemens Cloud for Industry* может использоваться в области технического обслуживания по текущему состоянию, управления данными по потреблению энергии и оптимизации ресурсов [9].

Winnum – платформа для промышленного Интернета для удаленного контроля показателей сборочного, измерительного и испытательного оборудования. Платформа включает в себя модули для подключения устройств, защищенное облако, платформу для подключения пользователей, готовые к использованию отраслевые решения и библиотеки разработчика.

Winnum позволяет решать задачи различной сложности: мониторинг внешней среды, состояния оборудования, выбранных параметров его работы и эксплуатации, удаленный анализ предупреждений и критических ошибок работы, удаленную диагностику, проводить превентивный или дистанционный ремонт. На базе *Winnum* возможно создание систем, способных работать автономно с автоматическим взаимодействием с другими устройствами и системами.

В базовом исполнении *Winnum* обеспечивает три режима работы с сигналами: чтение или запись свойств, отслеживание событий, выполнение действий при получении команды или при возникновении какого-либо события [10].

Yandex Data Factory – международное подразделение компании «Яндекс», которое специализируется на облачном анализе больших данных и применении для решения задач промышленности таких технологий, как машинное обучение, распознавание образов, глубокие нейронные сети и др.

EC-GSM – данная технология предусматривает сравнительно небольшие изменения относительно базового GSM/GPRS/EDGE, что позволяет использовать подавляющее большинство установленных базовых станций этого стандарта без замены или модернизации аппаратного обеспечения.

Ключевое преимущество EC-GSM заключается в готовности сетевой инфраструктуры (в большинстве случаев требуется только обновление ПО на узлах сети), а также в распространенности сетей стандарта GSM и их охвата.

eMTC (встречаются также названия LTE-M, LTE Cat.M1) – адаптация IoT для LTE-сетей. Важное отличие технологии eMTC – высокая пропускная способность, до 1 Мбит/с в каждом направлении (от абонента и к абоненту). eMTC призван обеспечить снижение стоимости конечного IoT-устройства за счет отказа от функциональности LTE, которая востребована и широ-

а) б)

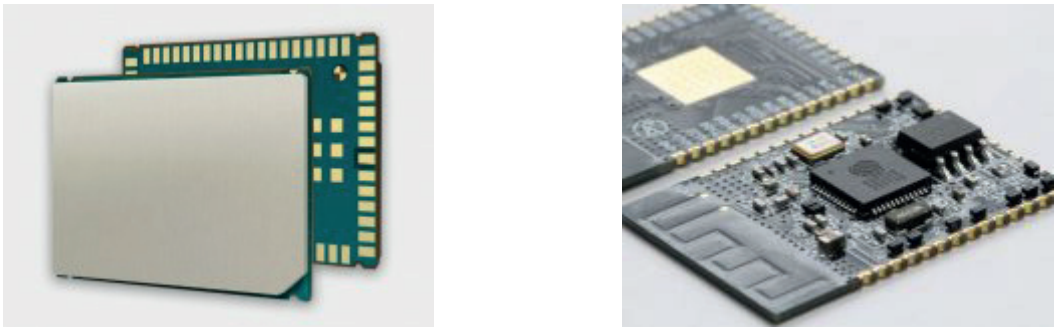


Рис. 7. Модули беспроводного промышленного Интернета:
а – Cinterion® BGS1 –2G GSM/GPRS-модуль; б – ESP32 – Wi-Fi/Bluetooth-чип

ко применяется в сетях мобильного широкополосного доступа, но становится избыточной при массовом подключении IoT-устройств.

eMTC имеет высокую степень готовности сетевой инфраструктуры и может быть развернута на существующих сетях LTE путем обновления ПО. Более того, сети мобильного широкополосного доступа и IoT могут сосуществовать и динамически перераспределять используемые ресурсы (частотный спектр, вычислительную мощность базовой станции и др.) в зависимости от типа и количества подключенных устройств и создаваемого ими трафика.

NB-IoT – *Narrow band* IoT (узкополосный IoT) – это относительно новое направление развития сетевых IoT-технологий, которое может как тесно взаимодействовать и интегрироваться с LTE, так и использоваться самостоятельно.

Ожидается, что существенная переработка протоколов канального уровня позволит снизить стоимость устройства NB-IoT по сравнению с LTE Cat.M1 на 90%.

На рис. 7 приведен пример инструментальных средств, позволяющих обеспечить подключение промышленного оборудования к промышленному Интернету с целью цифровизации производственных процессов: 2G GSM/GPRS-модуль промышленного класса Cinterion® BGS1, предназначенный для связи между устройствами (M2M), и Espressif ESP32 – Wi-Fi/Bluetooth-чип с низким энергопотреблением, разработанный для носимой электроники и приложений Интернета вещей [11].

Проведенное исследование дало возможность сформулировать новые требования к методам и моделям обеспечения конкурентоспособности предприятия транспортного машиностроения в долговременном периоде. В частности, цифровизация в условиях Индустрии 4.0 выдвигает новые требования к методам оценки рисков, не требующих присутствия экспертов.

Наибольшими последствиями для предприятия, работающего в условиях четвертой промышленной революции, обладают риски, связанные с человеческим фактором и потерей энергоснабжения. Вторыми по значимости являются киберриски [12].

Мероприятия по устранению и минимизации рисков должны подразумевать использование элементов ситуационного управления, в частности разработку классификаторов и планов обеспечения непрерывности бизнеса (BCP).

Основным фактором роста производительности на машиностроительном предприятии в условиях Индустрии 4.0 является способность прогнозировать и предотвращать простои, а также оптимизировать эффективность и техническое обслуживание оборудования. Применение искусственных нейронных сетей позволяет прогнозировать техническое состояние оборудования. Благодаря своевременному профилактическому техническому обслуживанию предотвращаются дорогостоящий ремонт и незапланированные простои.

Библиографический список

1. Правительство России. Распоряжение правительства РФ № 1632-р от 28 июля 2017 г. об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации», Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642. URL: http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf.
2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011. Менеджмент риска. Методы оценки риска. М.: Стандартинформ, 2012. 70 с.

3. Cybersecurity and privacy risks of Industry 4.0. URL: http://usblogs.pwc.com/emerging-technology/wp-content/uploads/2017/02/PwC_Next-in-Tech_Infographic_Cybersecurity-1.pdf.
4. ГОСТ Р 53647.1-2009. Менеджмент непрерывности бизнеса. Ч. 1. Практическое руководство. М.: Стандартинформ, 2010. 40 с.
5. ГОСТ Р 53647.1-2009. Менеджмент непрерывности бизнеса. Ч. 2. Требования М.: Стандартинформ, 2010. 17 с.
6. Information Security Assurance and Quality Assurance in IT. URL: http://isqa.ru/bcm-terms.
7. Есть ли у вас план?! URL: https://www.osp.ru/cio/2005/02/173815.
8. *Бабокин, Г. И.* Применение нейронных сетей для диагностики электромеханических систем / Г. И. Бабокин, Д. М. Шпрехер // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). № 3. 2011. С. 132–139.
9. MindSphere – open IoT operation system. URL: https://www.siemens.com/global/en/home/products/software/mindsphere.html.
10. Winnum – платформа для промышленного Интернета вещей. URL: http://winnum.ru.
11. Gemalto. Machine-to-Machine. URL: https://www.gemalto.com/m2m.
12. Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland. URL: https://www.bsi.bund.de/DE/Publikationen/Lageberichte/bsi-lageberichte.html.

УДК 006.058

Я. А. Щеников*
кандидат технических наук, доцент
А. А. Герасимова*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕЖДУНАРОДНЫХ И ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СТАНДАРТОВ В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ И ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ НА ИХ ОСНОВЕ

В статье рассмотрены вопросы актуальности существующих российских и зарубежных стандартов для производства печатных плат. Проведен их сравнительный анализ.

***Ключевые слова**: обеспечение качества печатных плат, стандартизация, стандарты IPC, стандарты МЭК, стандарты ГОСТ.*

Y. A. Shchenikov*
PhD. Tech., Associate Professor
A. A. Gerasimova*
Postgraduate Student
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

COMPARATIVE ANALYSIS OF INTERNATIONAL AND NATIONAL STANDARDS IN THE FIELD OF QUALITY ASSURANCE OF PRINTED CIRCUIT BOARDS AND PRINTED CIRCUIT ASSEMBLIES ON THEIR BASIS

The article deals with the relevance of the existing Russian and foreign standards for the production of printed circuit boards. Their comparative analysis is carried out.

***Keywords:** quality assurance of printed circuit boards, standardization, IPC standards, IEC standards, GOST standards.*

За последнее десятилетие в отечественном электронном приборостроении накопилось множество нерешенных проблем, связанных с тем, что часть действующей в России нормативно-технической базы для производства печатных плат последний раз обновлялась в 2012–2013 годах на базе международных стандартов, многие из которых были приняты еще в 90-х годах XX века. В связи с этим появляется необходимость разработки обновленной нормативно-технической базы, которая будет отвечать современным требованиям электронной промышленности.

Для электронной промышленности характерны высокие темпы развития – новые технологии приходят на смену старым каждые три-пять лет, порождая все новые поколения электронных приборов. При этом российские стандарты зачастую отражают устаревшую материальную базу отрасли.

В связи с этим возникает необходимость проведения сравнительного анализа текущего состояния стандартизации в области проектирования и производства печатных плат в РФ и за рубежом.

Далее приведены результаты сравнительного анализа российских и международных стандартов в области обеспечения качества печатных плат по пяти категориям:

– требования к документации на печатные платы;
– конструирование печатных плат;
– характеристики печатных плат;
– методики испытаний печатных плат;
– ремонт и восстановление печатных плат.

Стандарты, относящиеся к категории «требования к документации на печатные платы», приведены в табл. 1.

Итак, согласно информации, приведенной в табл. 1, стандарты ассоциации IPC более пол-

Таблица 1

Стандарты в категории «требования к документации на печатные платы»

IPC	IEC (МЭК)	ГОСТ
1. Серия IPC-2610:2010. Требования к электронной документации IPC-2611:2010. Общие требования к документации на электронные приборы IPC-2612:2010. Частные требования к документации по электронным схемам (схематические и логические описания) IPC-2614:2010. Частные требования к документации по изготовлению плат	1. IEC 61082. Подготовка документов, используемых в электротехнике Ред. 1: IEC 61082-2:1993. Функционально-ориентированные диаграммы Ред. 2: IEC 61082-3:1993. Схемы подключения, таблицы и списки Ред. 3: IEC 61082-4:1996. Документы, используемые при размещении и установке Ред. 4: IEC 61082-1:2014. Документы, используемые в электротехнике. Подготовка. Часть 1. Правила	1. ГОСТ 3.1428:1991 ЕСТД. Правила оформления документов на технологические процессы (операции) изготовления печатных плат 2. ГОСТ 2.123:1993 ЕСКД. Комплектность конструкторских документов на печатные платы при автоматизированном проектировании 3. ГОСТ IEC 61082-1-2014. Документы, используемые в электротехнике. Подготовка. Часть 1. Правила

но отражают современный уровень развития требований к документации на печатные платы. Стандарты МЭК выходят с отставанием приблизительно в четыре года и недостаточно глубоко отражают современный уровень развития электронной документации. Два отечественных стандарта в этой категории приняты в начале 90-х годов XX века. Благодаря сотрудничеству с МЭК и вступлению России в Совет ИСО 25 сентября 2005 года был переведен стандарт ГОСТ IEC 61082-1-2014. Документы, используемые в электротехнике.

Стандарты, относящиеся к категории «конструирование печатных плат», приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что стандарты IPC категории «конструирование печатных плат» публикуются раньше и чаще, чем стандарты МЭК. Отечественные стандарты в данной категории не отстают от зарубежных. Так, например, в 2013 году был опубликован стандарт ГОСТ Р 55693-2013 по техническим требованиям к печатным платам.

Стандарты, относящиеся к категории «характеристики печатных плат», приведены в табл. 3.

Согласно анализу информации, содержащейся в табл. 3, для категории «характеристики печатных плат» ассоциация IPC опубликовала новые версии требований для всех видов печатных плат в 2016–2017 годах. Стандарты серии МЭК разделены на следующие элементы: характеристики печатных плат, проектирование и использование печатных плат, разъемы, соединители. Также в 2007 году опубликовано руководство по характеристикам односторонних, двухсторонних и гибких печатных плат. Отечественные стандарты в 2013 году были переведены на русский язык с материалов стандартов серии МЭК, опубликованных в период с 1997 до 2017 год.

Стандарты, относящиеся к категории «методики испытаний печатных плат», приведены в табл. 4.

Согласно анализу информации, содержащейся в табл. 4, установлено, что стандарты ассоциации IPC представляют собой сформированный пакет руководств по проведению испытаний и руководство по применению. В стандартах МЭК, в отличие от одного общего стандарта IPC, выпущено пять отдельных стандартов, посвященных различным методам испытаний. Частота публикаций методов испытаний в стандартах МЭК опережает стандарты IPC. В российской стандартизации в категории «методики испытаний печатных плат» единственным современ-

Таблица 2

Стандарты в категории «конструирование печатных плат»

IPC	IEC (МЭК)	ГОСТ
1. IPC-2581. Общие требования к изготовлению печатных плат. Методология описания производства и передачи данных Ред. 1: IPC-2581:2012 Ред. 2: IPC-2581B:2013 Ред. 3: IPC-2581B-WAM1:2016 2. IPC-2615:2010. Размеры печатной платы и допуски	1. IEC 60194. Проектирование печатной платы, изготовление и сборка IEC 60194-1:2015. Условия и определения IEC 60194-2:2017. Словарь. Общее использование в электронных технологиях, а также технологии печатной платы и электронной сборки	1. ГОСТ Р 53386-2009. Платы печатные. Термины и определения 2. ГОСТ Р 55693-2013. Платы печатные жесткие. Технические требования

Таблица 3

Стандарты в категории «характеристики печатных плат»

IPC	IEC (МЭК)	ГОСТ
1.IPC-6010. Серия стандартов, посвященных техническим характеристикам печатных плат IPC-6011:1996. Общие требования к эффективности печатных плат IPC-6012. Оценка и требования к эффективности жестких печатных плат Ред. 1: IPC-6012A-AM:1999 Ред. 2: IPC-6012B:2004 Ред. 3: IPC-6012C:2010 Ред. 4: IPC-6012D:2015 Ред. 5: IPC-6012D-AM1:2017 IPC-6013. Квалификация и требования по производительности для гибких/жестко-гибких печатных плат Ред. 1: IPC-6013A:2005 Ред. 2: IPC-6013A:2006 Ред. 3: IPC-6013B:2009 Ред. 4: IPC-6013C:2013 Ред. 5: IPC-6013D:2017 IPC-6017:2009. Требования и технические характеристики печатных плат, содержащих встроенные пассивные устройства IPC-6018. Требования к конструкции и материалам для высокочастотных (СВЧ) печатных плат Ред. 1: IPC-6018A:2002 Ред. 2: IPC-6018B:2011 Ред. 3: IPC-6018C:2016	1. IEC 61188. Печатные платы и печатные узлы – Проектирование и использование. Общие требования Ред. 1: IEC 61188-1-1:1997. Приемлемая плоскостность для электронных сборок Ред. 2: IEC 61188-1-2:1998. Контролируемое волновое сопротивление IEC 61188-5. Анализ соединений (посадочные места для монтажа компонентов) Ред. 1: IEC 61188-5-1:2002. Общие требования Ред. 2: IEC 61188-5-2:2003. Дискретные компоненты Ред. 3: IEC 61188-5-6:2003. Компоненты с J-образными выводами с четырех сторон Ред. 4: IEC 61188-5-3:2007. Компоненты с выводами в виде «крыла чайки» с двух сторон Ред. 5: IEC 61188-5-4:2007. Компоненты с J-образными выводами с двух сторон Ред. 6: IEC 61188-5-5:2007. Компоненты с выводами в виде «крыла чайки» с четырех сторон Ред. 7: IEC 61188-5-8:2007. Компоненты с матрицей контактов (BGA, FBGA, CGA, LGA) IEC 61188-7. Нулевая ориентация электронных компонентов для создания библиотек САПР Ред. 1: IEC 61188-7:2009 Ред. 2: IEC 61188-7:2017 2. IEC 62496-1:2008. Комбинированные электрооптические печатные платы. Общие требования 3. IEC 61076-2: 2011. Разъемы для электронного оборудования. Требования к продукции. Часть 2: Спецификация для круглых разъемов IEC 61076-2-111:2017. Соединители для электрического и электронного оборудования. Требования к продукции. Часть 2-111: Круглые соединители 4. IEC 62326-4:1996. Платы печатные. Часть 4. Жесткие многослойные печатные платы с межслойными соединениями. Групповые технические условия IEC/PAS 62326-7-1:2007. Руководство по функциональным характеристикам односторонних и двусторонних гибких печатных плат	ГОСТ IEC 61188. Печатные платы и печатные узлы. Проектирование и применение. Общие требования Ред. 1: ГОСТ IEC 61188-1-1-2013. Приемлемая плоскостность для электронных сборок Ред. 2: ГОСТ Р МЭК 61188-1-2-2013. Контролируемое волновое сопротивление IEC 61188-5. Анализ соединений (посадочные места для монтажа компонентов) Ред. 1: ГОСТ Р МЭК 61188-5-1-2012. Общие требования Ред. 2: ГОСТ Р МЭК 61188-5-2-2013. Дискретные компоненты Ред. 3: ГОСТ Р МЭК61188-5-3-2013. Компоненты с выводами в виде «крыла чайки» с двух сторон Ред. 4: ГОСТ Р МЭК 61188-5-4-2013. Компоненты с J-образными выводами с двух сторон Ред. 5: ГОСТ Р МЭК 61188-5-5-2013. Компоненты с выводами в виде «крыла чайки» с четырех сторон Ред. 6: ГОСТ Р МЭК 61188-5-6-2013. Компоненты с J-образными выводами с четырех сторон Ред. 7: ГОСТ Р МЭК61188-5-8-2013. Компоненты с матрицей контактов (BGA, FBGA, CGA, LGA) ГОСТ Р МЭК 61188-7-2017. Нулевая ориентация электронных компонентов для создания библиотек САПР

ным стандартом является внедренный в 2013 году ГОСТ Р 55744-2013 по методам испытаний физических параметров печатных плат.

Стандарты, относящиеся к категории «ремонт и восстановление», приведены в табл. 5.

Согласно информации, приведенной в табл. 5, стандарты ассоциации IPC публикуются чаще. Первый стандарт IPC был опубликован в 1991 году, а последний – в 2017 году. Стандарты МЭК были внедрены в 2006 году и больше не подвергались редакции. В данной категории отечественным стандартам удалось восстановить свой задел с 1997 года, благодаря выходу в 2013 году стандарта по правилам восстановления и ремонта печатных плат.

Ассоциация IPC предоставляет предприятиям такие инструменты и программы, как повышение технологического уровня производства и качества управления им, разработка необходимых стандартов, взаимоотношения с государственными структурами и защита окружающей среды.

Стандарты IPC получили широкое распространение и признание во всем мире. Ассоци-

Таблица 4

Стандарты в категории «методики испытаний печатных плат»

IPC	IEC (МЭК)	ГОСТ
1. IPC-TM-650:2012. Пакет руководств по проведению испытаний 2. IPC-9691. Руководство пользователя для IPC-TM-650 Ред. 1: IPC-9691A:2005 Ред. 2: IPC-9691B:2016	1. IEC 61189-2. Методы испытаний для электрических материалов, печатных плат и других взаимосвязанных конструкций и сборок Ред. 1: IEC 61189-2:2006. Методы испытаний материалов для межсоединительных конструкций Ред. 2: IEC 61189-2-719:2016. Методы испытаний материалов для структур межсоединений. Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс потерь (от 500 МГц до 10 ГГц) 2. IEC 61189-3. Методы испытаний для электрических материалов, печатных плат и других взаимосвязанных конструкций и сборок Ред. 1: IEC 61189-3:2007. Методы испытаний для межсоединений (печатные платы) Ред. 2: IEC 61189-3-719:2016. Методы испытаний для межсоединений (печатных плат). Контроль изменения сопротивления одиночного покрытия (ПТГ) при циклировании температуры Ред. 3: IEC 61189-3-913:2016. Метод испытания теплопроводности электронных печатных плат для светодиодов высокой яркости 3. IEC 61189-5. Методы испытаний печатных плат. Общие методы испытаний материалов и сборок Ред. 1: IEC 61189-5:2006. Методы испытаний печатных плат Ред. 2: IEC 61189-5-2:2015. Пайка флюсом для печатных плат Ред. 3: IEC 61189-5-3:2015. Паяльная паста для печатных плат Ред. 4: IEC 61189-5-1:2016. Рекомендации по сборке печатных плат Ред. 5: IEC 61189-5-503:2017. Испытание проводящих анодных нитей (CAF) печатных плат 4. IEC 61189-11:2013. Измерение температуры плавления или температурных диапазонов плавления припоя 5. Серия IEC 60060:2011. Высоковольтные методы испытаний IEC 60060-1:2011. Общие определения и требования к испытаниям IEC 60060-2:2011. Измерительные системы	1. ГОСТ 23752.1:1992 (МЭК 326-2:1990). Платы печатные. Методы испытаний 2. ГОСТ Р 55744-2013. Платы печатные. Методы испытаний физических параметров

Таблица 5

Стандарты в категории «ремонт и восстановление печатных плат»

IPC	IEC (МЭК)	ГОСТ
1. IPC-7711/7721. Доработка, модификация и ремонт электронных сборок Ред. 1: IPC-7711/7721:1991 Ред. 2: IPC-7711/7721A:2003 Ред. 3: IPC-7711/7721B:2007 Ред. 4: IPC-7711/7721C:2017	1. IEC 60706. Поддержание работоспособности оборудования IEC 60706-2:2006. Требования по обеспечению работоспособности и исследования на этапе проектирования и разработки IEC 60706-3:2006. Проверка и сбор, анализ и представление данных IEC 60706-5:2007. Испытание и диагностическое тестирование	1. ГОСТ Р 51039:1997. Платы печатные. Требования к восстановлению и ремонту 2. ГОСТ Р 55491-2013. Платы печатные. Правила восстановления и ремонта

ация IPC существует за счет членских взносов компаний и средств, вырученных от продажи стандартов, видеокурсов и сертификации специалистов, тогда как МЭК финансируется странами-участницами, поэтому значимость стандартов IPC для международной общественности меньше, чем значимость стандартов МЭК. Вследствие этого ведущие мировые производители печатных плат переходят к внедрению стандартов МЭК, а Россия, как член МЭК, заинтересована в точном переводе этих стандартов на русский язык.

Проведенный в данной статье сравнительный анализ действующей отечественной нормативной базы, зарубежных стандартов МЭК и IPC позволяет сделать вывод, что стандарты IPC

актуализируются чаще стандартов МЭК и более полно отражают современный уровень развития промышленных технологий производства печатных плат. Требования отечественных стандартов для печатных плат зачастую отстают от требований международных стандартов. Следовательно, стоит ориентироваться на стандарты IPC, так как они охватывают стандарты полнее, чем МЭК, а также IPC требует использования инструментальных средств.

Библиографический список

1. *Алексеев, С.* Актуализация отечественных стандартов в области сборки и монтажа электронных модулей специального и ответственного применения // Современная электроника. 2015. № 9. С. 20–23.
2. Techstreet. URL: https://www.techstreet.com/standards/.
3. About the IEC. Vision & Mission. URL: http://www.iec.ch/.
4. IPC – Association Connecting Electronics. URL: http://www.ipc.org/ru/.

УДК 51-7

Н. Н. Рожков*
доктор технических наук, профессор
А. В. Матвеева*
аспирант
**Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна*

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОЦЕССОВ В ОБЛАСТИ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И КРИТЕРИЕВ ОПТИМИЗАЦИИ

Рассматривается математическая модель, с помощью которой осуществляется динамический контроль соблюдения комплекса нормативов, предусмотренных медико-экономическими стандартами, действующими в системе здравоохранения РФ. Модель позволяет также выработать рекомендации по внесению коррективов в целях дальнейшего совершенствования МЭС и повышения качества работы лечебных учреждений.

***Ключевые слова**: математическая модель, оценка качества процессов, медико-экономический стандарт.*

N. N. Rozhkov*
PhD. Tech., Professor
A. V. Matveeva*
PhD. Student
**Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design*

QUALITY MANAGEMENT OF HEALTHCARE PROCESSES USING MATHEMATICAL MODELS AND OPTIMIZATION CRITERIA

A mathematical model with the aim of monitoring the compliance of RF medical and economic standards requirements is considered. Possible approaches based on the model for making adjustments and further developing of the medical and economic standards aiming to improve the quality of medical care are described.

***Keywords:** mathematical model; processes quality management; medical and economic standards.*

С позиций процессного подхода оказание медицинской помощи следует рассматривать как комплекс сложных технологических процессов, одним из инструментов управления качеством которых служит обширная и многоуровневая система стандартов. Медико-экономический стандарт (МЭС) – один из видов стандартов, применяемых в лечебно-профилактических учреждениях (ЛПУ) на региональном уровне.

Медико-экономический стандарт (или тариф, как иначе принято его называть в последние годы) обладает сложной структурой взаимосвязей между составляющими его элементами. К этим элементам относятся:

– перечень услуг – любые воздействия на пациента, выполняемые в ходе оказания ему медицинской помощи со стороны ЛПУ;

– перечень лекарственных и иных средств, дополняющих процесс лечения пациента.

Каждая услуга характеризуется набором статистически оцениваемых показателей (частота и кратность оказания услуги, уровень трудозатрат врача и среднего медицинского персонала). Для каждого медикамента МЭС указывает среднее число единиц на курс лечения, а также частоту назначения препарата.

Контроль качества медицинской помощи, оказываемой в рамках МЭС, как правило, заключается в проверке соблюдения нормативных значений для указанных показателей. Итоги проверки имеют сугубо экономический характер, так как регулируют финансовые отношения между ЛПУ и страховыми организациями. Принцип оценки соблюдения норм МЭС до-

статочно прост: если фактические значения показателей не достигают установленной тарифом нормы, то страховая компания вправе не оплачивать оказанные медучреждением услуги, или оплатить лишь частично.

Рассматривая МЭС как объект исследования, необходимо учитывать важное отличие между стандартом как таковым и сложившейся практикой работы ЛПУ при оказании медицинской помощи на его основе для тех или иных категорий пациентов: МЭС не определяет ни последовательность оказания услуг, ни обусловленность оказания одних услуг результатами воздействия на пациента предшествующих услуг. Вместе с тем сложившаяся практика, основанная на достижениях медицинской науки, опыте медицинского персонала и т.п., очевидно, учитывает и отражает такие факторы, как логическая и технологическая последовательность оказания услуг разного характера, наличие в ЛПУ того или иного оборудования и т. д.

Следует оценить степень соответствия практики работы ЛПУ требованиям МЭС на основании опытных данных, а в случае устойчивого расхождения между ними – выработать рекомендации по внесению коррективов в те или иные параметры стандарта.

Предлагаемая для этих целей математическая модель включает множество S (наименований услуг) и множество M (наименований лекарственных средств, перечисленных в МЭС):

$$S=(S_1,..., S_n);\ M=(M_1,..., M_m). \qquad (1)$$

Каждый элемент $s_i \in S$ характеризуется четырьмя параметрами: $Ч_i$, $К_i$, $t(в)_i$, $t(с)_i$, значения которых указываются в тарифе для каждой услуги.

$$S_i=S_i\,(Ч_i,\ К_i,\ t(в)_i,\ t(с)_i), \qquad (2)$$

где $Ч_i$ – частота применения услуги; $К_i$ – средняя кратность ее применения; $t(в)_i$, $t(с)_i$ – число условных единиц трудоемкости соответственно врача и среднего медицинского персонала для однократного оказания услуги.

В свою очередь каждый вид медикаментов M_j характеризуется средним числом единиц $СЧ(M_j)$ данного медикамента и частотой назначения $ЧН(M_j)$ на курс лечения.

Непосредственная работа модели начинается с ввода в модель данных о ходе лечения выборки пациентов. Для каждого из пациентов ($П_1$, $П_2$,..., $П_N$) его ход лечения, фиксируемый в его личной карточке в ЛПУ, может быть описан с помощью кортежа

$$П_i = \{В_i(1),\ В_i(2),\ ...\ ,\ В_i(k_i)\},\ i=1,..., N, \qquad (3)$$

где $В_i(j)$ обозначает блок воздействий на i-го пациента, осуществляемых в j-й по счету момент осуществления этих воздействий ($j=1,..., k_i$). Этот блок в свою очередь представляет собой последовательность из отдельных элементов множеств S и M:

$$В_i(j)=\{s_{ij(1)},\ s_{ij(2)},\ ....,\ M_{ij(1)},\ M_{ij(2)}\ ...\}. \qquad (4)$$

Блок вида (4) отражает набор услуг и лекарственных средств, получаемых пациентом в j-й день наблюдения в стационаре (или при j-м по счету посещении амбулатории). Он может содержать и один элемент, если в этот день (в этот приход) пациент получил только услугу или только лекарственное средство.

Формирование блоков (4) производится по факту одновременно с занесением данных в личную карточку пациента. В совокупности составленный из них кортеж (3) будет отражать последовательность воздействий на пациента, проходящего лечение по конкретному тарифу.

Организованные таким образом данные по всем N пациентам позволяют построить *матрицу контроля фактического выполнения нормативов МЭС*. Эта матрица, обозначаемая далее как $[МЭС]_{факт}$, имеет размеры $N \times n$, в ней одна строка соответствует одному пациенту, а столбец – одной конкретной услуге из множества S.

$$[МЭС]_{факт} = \begin{pmatrix} \varphi_{1,1} & \cdots & \varphi_{1,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \varphi_{N,1} & \cdots & \varphi_{N,n} \end{pmatrix}. \qquad (5)$$

Первоначально все $\varphi_{i,j}$ полагаем равными нулю. Далее, по мере формирования кортежей вида (3) каждый раз, когда пациент $П_i$ получает однократно услугу s_j, значение $\varphi_{i,j}$ увеличивается на 1. Тем самым $\varphi_{i,j}$ – это «счетчик» числа случаев оказания данной услуги конкретному пациенту по конкретному тарифу.

Формируемая матрица $[МЭС]_{факт}$ позволит осуществить проверку фактического соблюдения нормативов тарифа по каждой услуге. Для расчета фактических значений показателей «частота применения услуги» и «средняя кратность услуги» необходимо пользоваться формулами (6) и (7):

$$Ч_j^{(факт)} = \frac{N - n_0^{(j)}}{N}, \qquad (6)$$

где $n_0^{(j)}$ – число равных нулю элементов j-го столбца матрицы (5),

$$К_j^{(факт)} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \varphi_{i,j}}{N - n_0^{(j)}}. \qquad (7)$$

Статистические критерии для проверки значимости отклонения фактических значений $Ч_j^{(факт)}$ и $К_j^{(факт)}$ от значений $Ч_j$, $К_j$, указанных в МЭС, рассматривались ранее в работах [1] и [2].

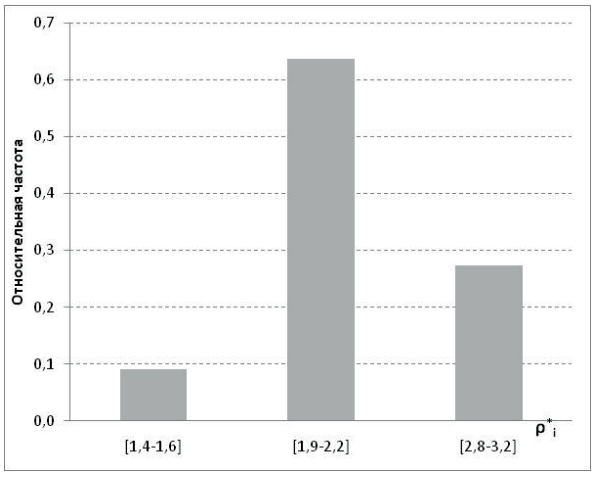
В качестве одного из наиболее простых методов анализа итогов применения того или иного МЭС можно рассмотреть разбиение данной выборки пациентов на максимально различимые между собой кластеры, внутри которых пациенты получают наиболее однородный набор услуг и медикаментов. Это может быть выполнено, в частности, путем подсчета евклидовых расстояний между векторами-строками матрицы (5), а также с помощью корреляционного анализа этой матрицы.

Элементы матрицы евклидовых расстояний между пациентами $П_i$ и $П_k$ (как точками в n-мерном пространстве) могут быть получены с помощью элементов строк матрицы (5):

$$\rho_{i,k} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (\varphi_{i,j} - \varphi_{k,j})^2}.$$

Эти значения могут использоваться в качестве инструмента для последующей кластеризации. Наличие большого числа значимо различных между собой кластеров указывает на неоднородность массива пациентов, ставит под сомнение применимость к ним одного и того же МЭС и может указывать на обоснованность разделения данного тарифа на несколько отдельных МЭС, призванных описать оказание услуг для более специфицированной группы пациентов.

Вместе с тем степень выполнения нормативов МЭС для каждого отдельно взятого пациента $П_i$



Диапазоны значений евклидовых расстояний ρ_i^* до идеальной точки МЭС

может быть оценена как его отклонение ρ_i^* от идеальной точки, в которой j-я координата равна среднему числу оказания услуги s_j, приходящемуся на одного пациента, согласно нормативам, указанным в стандарте. Это среднее число находится как произведение

$$\lambda_j = Ч_j \cdot К_j,$$

а его статистической оценкой служит произведение величин (6) и (7). Отклонение ρ_i^* находим по формуле

$$\rho_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (\varphi_{i,j} - \lambda_j)^2}. \qquad (8)$$

В качестве показателя соблюдения тарифа на данном массиве пациентов можно предложить использовать арифметическое среднее величин (8), взятое по всем $i = 1,..., N$.

С целью апробации построенной модели была исследована выборка из 72 пациентов, проходивших амбулаторное лечение по тарифу (МЭС) № 821010 в одном из медучреждений г. Санкт-Петербурга. На основании данных о фактическом исполнении тарифа был произведен расчет евклидовых расстояний (8), фрагмент результатов которого представлен на рисунке.

На рисунке можно видеть достаточно явное разбиение выборки пациентов на три группы. Наблюдаемые различия в целом обусловлены типом основного диагноза и, соответственно, потребностью пациентов в тех или иных услугах.

Предлагаемый подход к рассмотрению МЭС позволяет моделировать принцип их работы в практических условиях действия ЛПУ. Оценивая с помощью матрицы $[МЭС]_{факт}$ исполнение тарифов, можно получить представление как о пациентах, проходящих по ним лечение, так и о самом ЛПУ (оснащенность оборудованием, лабораториями и т. п.).

Если некоторые результаты отражают отличия от нормативных показателей МЭС, по ним возможно будет установить, в каких корректирующих воздействиях тариф может нуждаться. Эти воздействия могут заключаться в первую очередь в корректировке параметров $Ч_i$, $К_i$, $t(в)_i$ и $t(с)_i$ для одной или нескольких услуг. Кроме того, становится возможным представить кортежи (3) и (4) в виде ориентированных графов, определяющих индивидуальную траекторию лечения любого пациента. Каждая такая траектория и ее отдельные составляющие характеризуются определенной частотой наблюдения.

Значимое отличие частот одной (или нескольких) траекторий по сравнению с другими также может указывать на целесообразность разделения МЭС на несколько отдельных, более узких стандартов. В то же время наличие одинаковых траекторий, наблюдаемых с большой частотой в двух различных МЭС, может служить рекомендацией для специалистов-медиков рассмотреть возможность объединения этих двух данных МЭС в один общий стандарт.

Библиографический список

1. *Рожков, Н. Н.* Статистические методы контроля качества медицинских услуг на основе критериев соблюдения медико-экономических стандартов / Н. Н. Рожков, Д. Н. Суслов, О. А. Карамышева-Пигнатти // Вестник СПГУТД. Сер 1: «Естественные и технические науки». 2012. №1. С. 34–37.
2. *Рожков, Н. Н.* Оценка качества медицинских услуг на основе статистических критериев соблюдения норм медико-экономических стандартов // Информационно-управляющие системы. 2012. № 1. С. 84–87.

УДК 378.147

Е. С. Белова
аспирант
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

SMART-ТЕХНОЛОГИИ В ВЫСШЕМ ОБРАЗОВАНИИ

В статье рассматривается содержание концепции SMART-технологий для развития некоторых этапов современного образования.

***Ключевые слова**: системы управления, стратегии развития, высшее образование, SMART-технологии.*

E. S. Belova
PhD. Student
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

SMART-TECHNOLOGIES IN HIGHER EDUCATION

The article presents the content of the concept of SMART-technologies for the development of modern education.

***Keywords:** knowledge management; management systems; higher education; SMART-technologies.*

Социально ориентированная рыночная экономика предполагает значительное влияние государства на разрешение социальных нужд и проблем на основе базового курса социальной политики. При этом, говоря о внедрении инноваций во все сферы современного общества, важно понимать, как должны быть сформированы механизмы выработки инновационного потенциала: определить целевые индикаторы, приоритеты и основные задачи долгосрочной государственной политики в социальной сфере, сфере науки и технологий, а также структурных преобразований в экономике. Здесь факторами, определяющими конкурентоспособность инновационных систем, становятся высококвалифицированная рабочая сила, сохранение ее в стране.

В настоящее время информационные технологии становятся неотъемлемой частью жизненного пространства человека во всех сферах. Сегодня с уверенностью можно констатировать факт существования нового цифрового (сетевого) поколения людей, для которых мобильный телефон, компьютер и Интернет являются такими же естественными элементами их жизненного пространства, как природа и общество. Для развития современного образования уже недостаточно влияния человеческого капитала. Необходимо изменять саму образовательную среду, а не просто наращивать объемы образования трудовых ресурсов. Должно качественно измениться само содержание образования, его методы, инструменты и среды, необходим всеобщий переход к SMART-образованию.

Акроним SMART расшифровывается и дает значение следующим образом (в свою очередь являясь технологией постановки и формулировки целей): *Specific* (конкретность), *Measurable* (измеримость), *Attainable* (достижимость), *Relevant* (релевантность), *Time-bounded* (определенность во времени) [1].

Любая технология начинается с человека, внесшего вклад в ее разработку, человека, который смог мыслить иначе. Одной из основополагающих и базовых задач инновационного развития является создание условий для формирования принципиально нового образа мышления, затрагивающего ключевые аспекты инновационной деятельности, где на первом месте высокая восприимчивость к постоянно окружающим изменениям в собственной жизни, в экономическом развитии или в развитии науки и технологий.

Под SMART-технологиями понимается конкретное измерение актуальных достижений в ограниченном временном интервале. Обозначенный интервал взаимодействия в проектной деятельности обозначает увеличение скорости

решения тех или иных задач, которые ставятся не только в образовании, но и в сферах деятельности, связанных с образовательной деятельностью, что определяет динамику развития государства [2].

На сегодняшний день так называемое SMART-общество обновляет глобальную задачу перед университетами: возникает акцент на подготовке кадров, которые будут обладать креативным потенциалом и навыками работы в новом мире. Чтобы этого достичь, требуется вести обучение современным практическим навыкам: налаживание всесторонних коммуникаций в социальных сетях и отбор полезной информации, приоритет работы с электронными источниками, умение формировать личные базы знаний – все это изначально требует изменения природы процесса обучения.

Можно трактовать содержание концепции SMART-университетов по-разному в зависимости от конкретных стран [3], однако во всех случаях общая цель сводится к созданию ряда новых эффектов, которые смогут дать положительный результат в удовлетворении потребностей заинтересованных сторон.

Основные принципы SMART-университета [4]:

– гибкость обучения в интерактивной образовательной среде;

– персонализация и адаптация обучения;

– свободный доступ к информационным ресурсам всех типов по всему миру.

Для реализации SMART-обучения новые возможности создают технологические инновации и Интернет: студенты получают возможность приобрести профессиональные компетенции, предусмотренные конкретным планом обучения, на основе системного многомерного видения и изучения дисциплин с учетом их многоаспектности и непрерывного обновления содержания.

Если университет делает одной из своих целей своевременную реакцию и обратную связь относительно происходящих изменений и запросов обучающихся, ему потребуется соответствовать некоторым требованиям, среди которых можно назвать качественные показатели, инновации, гибкость, адаптивность. Стремление к осуществлению подобных решений при соблюдении всех условий и требований сможет не только вывести качество представляемых образовательных услуг на более высокий уровень, но и оптимизировать затраты на оснащенность материально-технической базы: SMART-технологии могут и должны быть использованы при реализации обучения, что в свою очередь заключается как в инструментальных технологиях ведения учебного процесса, так и в актуальных дисциплинах и учебных планах.

В концепции SMART-образования основополагающими являются:

1. Создание интеллектуальной среды непрерывного развития компетентностей не только обучающихся, но и всех участников существующего образовательного процесса, что в итоге представит изменения общего поведения через применение приобретенных компетенций.

2. Создание цели – это привитие навыков, которые станут необходимыми для ведения успешной деятельности в условиях цифрового общества и «умной» экономики.

Для построения успешно функционирующей рабочей модели, содержащей в себе SMART-элементы, потребуется выделить степень соответствия основным характеристикам SMART-образования.

1. Обеспечивается ли совместимость между программным обеспечением, разработанным для разных операционных систем? В данном случае бесшовность позволит предоставить равные условия для обучения, которые не будут зависеть от используемых устройств и при этом обеспечат возможность непрерывно реализовывать учебный процесс, а также не поставят под удар целостность учебной информации.

2. Обеспечивается ли независимость от времени и места, мобильность, повсеместность, непрерывность и простота доступа к той информации, которая может потребоваться в любой момент времени?

3. Каким образом можно увеличить автономность как преподавателя, так и учащегося – за счет использования мобильных устройств доступа (в том числе взаимного) к учебной информации?

4. Что в большей степени повлияет на измерение результативности учебного процесса – вид и форма полученных знаний или возможность применения их на практике?

5. Существует ли гибкое обучение с точки зрения предпочтений и индивидуальных возможностей учащегося? В этот перечень критериев могут войти такие, как возможность настройки обучения под индивидуальные параметры учащегося, в том числе исходные знания, опыт и навыки; стиль обучения; физиологическое и психологическое состояние в конкретный момент обучения [3].

Использование SMART-технологий способно повысить уровень сформированности компетенций обучающихся. Это возможно благодаря внедрению практико-ориентированных курсов

(мастер-классы, тренинги, взаимодействие с потенциальными работодателями по выбранным темам обучения, создание профессиональных сообществ).

Помимо акцентирования внимания на вопросах возможности внесения адаптивных изменений в технологию подачи образования с учетом предпочтительных критериев каждого из студентов, не следует забывать и о возможности постоянного повышения квалификации профессорско-преподавательского состава, что является одним из самых важных компонентов образовательной системы, и в конечном счете именно от этого будет зависеть старт реализации всего образовательного процесса.

Библиографический список

1. Mental Skills.URL: http://www.mental-skills.ru.
2. Электронное образование: перспективы использования SMART-технологий: матер. III Междунар. науч.-практич. Видеоконференции / Под ред. С. М. Моор. Тюмень: ТюмГНГУ, 2016. С. 15.
3. Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации. Библиотечно-информационный комплекс. URL: http://www.library.fa.ru.
4. *Антохина, Ю. А.* Создание инновационных проектов на основе ценностно ориентированного управления: монография / Ю. А. Антохина, А. Г. Варжапетян, Е. Г. Семенова. СПб.: ГУАП, 2018. 295 с.

УДК 658.5

К. В. Епифанцев
кандидат технических наук
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

ВВЕДЕНИЕ ТЕМАТИКИ 5S В КУРС ОБУЧЕНИЯ МЕТРОЛОГОВ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ

В статье приведены рекомендации по дополнению лекционного курса студентов по специальности 27.03.01 «Стандартизация и метрология» информацией по производственной технологии 5S.

***Ключевые слова**: профессиональные компетенции, инструменты качества, системы защиты от ошибок, современное предприятие, специалисты в области стандартизации и качества.*

K. V. Epifantsev
PhD. Tech.
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

INTRODUCTION THEMES 5S TRAINING COURSE OF METROLOGY FOR THE EXPANSION OF PROFESSIONAL COMPETENCES

The article provides evidence of the need to Supplement the lecture course of students in the specialty 27.03.01 «Standardization and Metrology» information on production technology 5S.

***Keywords:** professional competence, quality tools, error protection systems, modern enterprise, experts in the field of standardization and quality.*

В лекционном и практическом курсе по специальности 27.03.01 «Стандартизация и метрология» направленности «Метрология, стандартизация, сертификация» многие изучаемые термины дисциплины сложно воспринимаются студентами [1, 4], а базовые методики расчетов оторваны от реалий современного предприятия.

Преодолеть данный барьер позволили возможность тесного общения с отделом качества, консультации со специалистами соседних городов по *Skype* и увеличение количества часов на экскурсионные мероприятия. Компании, с которыми в настоящее время налажено сотрудничество, аттестованы по системе *Total Quality Management System* [2]. Это следующие компании:

1) ООО «Gestamp-Северсталь» (Всеволожск),

2) ОАО «ММК – Сервисный металлоцентр Intercos-IV» (Колпино),

3) ООО «Gruppo Antolin» (Всеволожский район Санкт-Петербурга),

4) ООО «Металлопродукция» (Невский район Санкт-Петербурга),

5) ООО «Philipp Morris» (Красносельский район Санкт-Петербурга),

6) ООО «Nissan Manufacturing Rus» (Приморский район Санкт-Петербурга),

7) ООО «Новолипецкий металлургический комбинат» (Липецкая область),

8) АО «Алмаз-Антей» (Невский район Санкт-Петербурга).

Во время практических и лабораторных работ рассматриваются примеры процесса согласования и производства части (PPAP), анализа видов и последствий потенциальных отказов (FMEA), базовые методики быстрой переналадки оснастки (SMED), система защиты от ошибок (*Poka-Yoka*), системы рационализации производства (*Kaidzen*), системы статистического контроля (*SPC*), технологии анализа корневых проблем (*Isikawa diagramm*) [3].

Несмотря на работу современных производственных линий на вышеуказанных предприятиях, отделы по стандартизации и качеству нуждаются в подготовленных специалистах в области оптимизации процессов, знающих методы выявления бракованных партий, неотлаженного процесса. Во многих компаниях основной причиной этого является неслаженная ра-

бота отдела качества, отсутствие вовлеченности персонала в процесс, низкий уровень подготовки в вузе.

На занятиях по стандартизации в ГУАП помимо практических работ, направленных на проверку гипотез о нормальных законах распределения, изучение законов Фишера, Пирсона, Стьюдента, было выделено несколько практических работ для изучения технологии *Lean Manufacturing* – бережливого производства (5S). Большой производственный опыт стал основой для написания курса практик. Студенты, посещая указанные ранее предприятия, сталкиваются с реальными проблемами отдела качества на предприятии, выделяют базовые ошибки и погрешности в действиях групп техников-метрологов, инженеров по приемке сырья, специалистов по рекламациям, инженеров по качеству.

Часто хаос на производстве приводит к травмам и непоправимым последствиям, особенно если работа связана со станками. Система 5S способна предотвратить возникновение несчастных случаев на предприятии благодаря правильной организации порядка на рабочем месте. Кроме того, его эстетичный вид повышает производительность труда. Еще одно достоинство порядка на рабочем месте – экономия времени: если раньше на поиск необходимых документов затрачивалось большое количество времени, то теперь делать это стало гораздо проще и быстрее.

Использование системы 5S благотворно сказывается на рабочем климате и отношениях между сотрудниками. В силу вышеприведенных обстоятельств персонал учреждения избавляется от раздражительности и негативных эмоций, в результате снижается себестоимость изделия, а самое главное – у предприятия появляется возможность прохождения аудита для поставки определенных деталей на экспорт.

Важный момент – обсуждение статуса Q1. *Quality system* Q1 – система контроля качества, которая обеспечивает единый стандарт производства компонентов для поставщиков *Ford* в мире. Статус Q1 позволяет TPM при выпуске продукции для автомобилей *Ford* самостоятельно проводить одобрение процесса согласования производства части, а также дает предприятию привилегии при участии в конкурсах поставщиков для новых продуктов *Ford* [1].

Взаимодействие с лучшими представителями российских и зарубежных компаний в области качества готовой продукции, изучение новейших методик в области улучшения качества и уменьшения простоев – залог хорошо подготовленных квалифицированных специалистов.

В качестве примера проводимых практических работ можно выделить следующие:

– «Изучение технического законодательства РФ»,

– «Гармонизация стандартов типа ГОСТ Р ИСО»,

– «Составление FMEA технологической операции приборостроительной компании»,

– «Расчет OEE производственного участка»,

– «Исследование вопросов развертывания функций *Measurment System Analasys* (MSA) на предприятии».

Библиографический список

1. *Майборода, В. П.* Всеобщее управление качеством: учебник / В. П. Майборода, В. Н. Азаров, А. Ю. Панычев, Ю. А. Усманов. М.: УМЦ ЖДТ, 2013. 572 с.
2. *Козырев, В. А.* Развитие систем менеджмента качества: учеб. пособие / В. А. Козырев, А. Н. Лисенков, С. В. Палкин; под ред. В. А. Козырева. М.: УМЦ ЖДТ, 2014. 268 с.
3. ГОСТ Р ИСО/ТУ 16949-2009 «Системы менеджмента качества. Особые требования по применению ИСО 9001:2008 в автомобильной промышленности и организациях, производящих соответствующие запасные части». «Quality management systems – Particular requirements for the application of ISO 9001:2008 for automotive production and relevant service part organizations»).
4. Интеграция производства в образовательные программы вузов горного профиля / А. А. Власов, С. В. Жуков, Н. А. Власова, К. В. Епифанцев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 2. С. 241–251.

УДК 378.145.3

Т. П. Мишура*
кандидат технических наук, доцент
К. В. Епифанцев*
кандидат технических наук
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ СРЕДЫ И ЛИЧНОГО КАБИНЕТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ В ДВУХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЕ ОБУЧЕНИЯ

В статье анализируются современные аспекты повышения качества образования, включая сочетание различных современных образовательных технологий, в том числе информационно-дистанционную среду обучения, что позволяет вузам готовить высококвалифицированных специалистов, удовлетворяя запросы работодателя.

Ключевые слова*: практическая подготовка специалистов, высшее образование, проблемы обучения, система «Завод-втуз», качество образования, введение системы 5S, ЭИОС.*

T. P. Mishura*
PhD. Tech., Associate Professor
K. V. Epifantsev*
PhD. Tech.
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE USE OF THE ELECTRONIC EDUCATIONAL ENVIRONMENT FOR THE IMPLEMENTATION OF THE DUAL SYSTEM OF EDUCATION

The modern aspects of improving the quality of education are analyzed, including the combination of various modern educational technologies, including the information and distance learning environment, which allows universities to train highly qualified specialists, satisfying the employer's requests.

Keywords: *practical training of specialists, higher education, learning problems, Zavod-VTUZ system, quality of education, introduction of 5S, EIOS.*

Повышение качества образования актуально для любого высшего учебного заведения. Сегодня изучаются все возможные современные аспекты этой проблемы, а также предшествующий опыт работы.

Одной из важнейших задач при подготовке специалиста всегда было приобретение практического опыта выпускником. Эта задача успешно реализовывалась высшими техническими учебными заведениями на базе заводов (втуз). Первые втузы были созданы в СССР в 1930 году на базе крупных промышленных предприятий, как, например, втуз при предприятии «Завод имени И. А. Лихачёва» (открылся 1 февраля 1931 года) как филиал вечернего автомеханического института [1].

В 1971 году в СССР было три самостоятельных завода-втуза, а в середине 1980-х годов в СССР было уже несколько заводов-втузов, наиболее известные из них: втуз при Ленинградском металлическом заводе им. 22-го съезда КПСС [3], втуз при Ростовском заводе сельскохозяйственного машиностроения «Ростсельмаш» и Московском автомобильном заводе им. И. А. Лихачева.

Особенностью втузов была интегрированная подготовка, основанная на взаимодействии двух субъектов – вуза и предприятия. Подобный опыт образования был развит в странах ближнего и дальнего зарубежья: в Англии подобная система названа *Sandvich*, в США – кооперированная система [2].

Функционирование системы втуз в СССР имело ряд положительных моментов. Это и возможность объективно оценивать потребности предприятий в трудовых ресурсах, и управлять

численностью обучающихся, а также в обязательном порядке предоставлять выпускникам вузов рабочие места, что позволяло удовлетворять потребности предприятий в высококвалифицированных кадрах.

Однако в этой системе имелись и недостатки. При переходе от дневной формы обучения к вечерней после 1-го и 3-го курсов, когда у студентов одновременно возрастали нагрузки при обучении в соответствии с учебным планом и на производстве (как правило, студент к этому времени уже занимал должность «мастера»), качество восприятия материала ухудшалось и наблюдался спад успеваемости. Тем не менее главным преимуществом такой системы оставалось то, что выпускники к моменту окончания обучения приобретали большой практический опыт (минимальный стаж к выпуску из вуза достигал 1,5 года).

После 1990-х годов устойчивая система взаимодействия «вуз – предприятие – государство» перестала функционировать по причине осложнения решения вопросов обязательного распределения выпускников [4]. Численность заводов-втузов с 1990 года быстро сокращалась и к 2010 году уменьшилась на 70% по сравнению с предыдущим периодом.

В настоящее время в технических вузах отведено небольшое количество часов для производственной практики – от 2 до 3 месяцев за весь период обучения. Для сравнения: при системе совмещенного образования во втузах в советский период курс практической подготовки составлял от 2 лет и более. Двухуровневая система подготовки сократила практический курс, возлагая ответственность за качество практической подготовки на преподавателей.

С целью сохранения положительного опыта подготовки высококвалифицированных специалистов в 2004 году МГТУ им. Н. Э. Баумана, возглавляющий ассоциацию технических университетов России, организовал масштабные мероприятия с привлечением основных потребителей инженерных кадров. Проводились совещания, конференции, заседания учебно-методических объединений (УМО) по высшему образованию. Резюме выработанных решений: необходимость «...сохранения возможности подготовки дипломированных специалистов для наукоемких производств по программе сроком 5–5,5 года, что имеет принципиальное значение в обеспечении реальных потребностей промышленности» [4, 5].

Однако переход системы образования на двухуровневую не позволил в полном объеме реализовать эти решения. Поскольку потребность промышленности в высококвалифицированных кадрах постоянно растет, перед высшими учебными заведениями стоит задача готовить бакалавров с опытом практической работы.

Для решения этой проблемы в настоящее время в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения (ГУАП) укрепляется непосредственное взаимодействие преподавателей, имеющих практический опыт, с предприятиями. Очень важным дополнением в формировании такого опыта могла бы стать обязательная продолжительная стажировка на действующем предприятии. Это позволило бы дополнить высокий теоретический уровень преподавателей передовым практическим, включая новые технологии.

Примером использования такого опыта в учебном процессе служит применение используемых на предприятии нормативных документов, переданных университету по соглашению. Если есть возможность, организуется общение со специалистами компаний по *Skype*, привлечение их к учебному процессу, проведение совместных семинаров, увеличение количества часов на ознакомительные мероприятия [8].

На занятиях по стандартизации помимо практических работ по проверке гипотез о нормальных законах распределения, изучению законов Фишера, Пирсона, Стьюдента было выделено большое количество времени на освоение технологии *Lean Manufacturing* – бережливого производства.

Взаимодействие с лучшими представителями российских и зарубежных компаний, увеличение длительности взаимодействия с приглашенными специалистами с предприятий, вовлечение студентов в участие хоздоговорных работ на предприятиях – залог хорошо подготовленных квалифицированных специалистов.

Второе направление повышения качества подготовки – развитие новых информационных технологий.

В быстро развивающейся системе информационно-образовательного пространства особую роль играет высшее образование заочной формы. Хорошо известны особенности организации работы со студентами заочниками.

Одной из проблем является огромная концентрация студентов в сессионный период. Например, в настоящее время в ГУАП ведется обучение по 28 направлениям, включая бакалавриат, специалитет и магистратуру. Это требует четкой работы деканатов с целью обеспечения каждого студента учебно-методической литературой для самостоятельной работы в соответствии с направлением (специальностью), семе-

стром обучения или индивидуальным планом, так как при заочном образовании именно это является главным инструментом получения знаний.

Вторая проблема – обеспечение двухсторонней связи между студентами, университетом и производственным предприятием, которую проблематично осуществить из-за удаленности их друг относительно друга.

В настоящее время практически у всех студентов имеется доступ к Интернету. Это позволяет решить проблему обеспечения студентов всеми необходимыми организационными сведениями и учебно-методической литературой в течение всего учебного года, а не только в сессионный период, снижая нагрузку на преподавателей.

Сегодня в ГУАП создана единая информационно-дистанционная система, которая позволяет решать все перечисленные проблемы.

Единая база данных связывает учебные планы по всем направлениям (специальностям), программы по изучаемым в каждом семестре дисциплинам и перечень учебно-методической литературы, рекомендованной для самостоятельного изучения каждого курса с контрольными вопросами и заданиями. Это относится ко всем формам образования. Однако для студентов-заочников действие такой системы особенно важно, так как в течение семестра они не имеют возможности непосредственно заниматься с преподавателями. На данном этапе все студенты через личный кабинет имеют возможность не только получить задания и методическую литературу, но и задать преподавателю вопросы, отправить выполненную работу на проверку и получить ответ с комментариями. Студент имеет возможность получить книги, учебники, методические указания, которые рекомендует преподаватель.

Какие организационные возможности дает эта система?

1. Обеспечение четкой работы деканата за счет снижения временных затрат на поиск необходимой информации независимо от места ее хранения.

2. Оперативное введение корректирующих данных при изменении кодов и наименований направлений (специальностей) обучения, учебных планов, в том числе и индивидуальных, пополнение каталога учебно-методической литературы, замена устаревших изданий на новые и др.

3. Обеспечение студентов-заочников возможностью в течение учебного года в любом городе, обращаясь к базе данных, найти информацию по учебно-методической обеспеченности любой дисциплины, расписание занятий, зачетов, экзаменов, фамилии преподавателей.

4. Введение дополнительных видов информации при необходимости.

Примером, подтверждающим эффективность обучения через дистанционную систему, может служить работа многих университетов, прочно зарекомендовавших себя на рынке образовательных услуг. Среди них особое место занимает Северо-западный заочный технический университет, который начал свою историю как завод-втуз, а в настоящее время снизил издержки и ведет образовательный процесс через информационные технологии.

Таким образом, использование опыта работы заводов-втузов, сочетание различных современных образовательных технологий, включая информационно-дистанционную среду обучения, позволяет вузам готовить высококвалифицированных специалистов, удовлетворяя потребности промышленных предприятий.

Библиографический список

1. *Ханнанова, Д. Х.* Социальное неравенство в системе высшего образования советского и постсоветского российского общества: дисс. канд. социологич. наук: 22.00.04. Казань, 2005. 178 с.
2. *Волков, С. С.* Интеллектуальный слой в советском обществе // Красные холмы (альманах). М., 1999. 259 с.
3. Сайт Санкт-Петербургского института машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ). URL: http://www.spb-business.ru.
4. Стратегия и структура подготовки инженеров для наукоемких отраслей. Взгляд работодателей: всерос. совещание-конференция. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.
5. *Пучков, Л. А.* О современном состоянии подготовки горных инженеров в российских вузах: докл. / Л. А. Пучков, В. Л. Петров // Материалы учеб.-методич. объединения (УМО) по высшему горному образованию. М., 2005.
6. ГОСТ Р ИСО/ТУ 16949-2009 «Системы менеджмента качества. Особые требования по применению ИСО 9001:2008 в автомобильной промышленности и организациях, производящих соответствующие запасные части».
7. Интеграция производства в образовательные программы вузов горного профиля / А. А. Власов, С. В. Жуков, Н. А. Власова, К. В. Епифанцев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № 2. С. 241–251.
8. Оценка введенной в лекционный и практический курс дисциплины «Метрология, стандартизация, сертификация» инструментов качества 5S» / К. В. Епифанцев, И. И. Сытько // Сб. трудов X Санкт-Петербургского конгресса «Профессиональное образование, наука и инновации в XXI веке». СПб.: ФГБОУ «ПГУПС», 2016. С. 188–190.

УДК 62-5

К. В. Епифанцев*
кандидат технических наук
В. В. Кульбик*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТОВ САПР ДЛЯ АНАЛИЗА ЗОН КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ ШНЕКАХ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ

В статье рассматривается вопрос моделирования установки для переработки отходов.
***Ключевые слова**: моделирование, САПР, переработка отходов, разрушение металла, напряжение, сварочный шов.*

K. V. Epifantsev*
PhD. Tech.
V. V. Kulbik*
Student
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

THE USE OF CAD SOFTWARE PACKAGES FOR THE ANALYSIS ZONES STRESS CONCENTRATION IN WELDED SENECAH IN THE RECYCLING

The article deals with the issue of simulation of waste treatment plant.
***Keywords:** modeling, CAD, recycling, destruction, metal, voltage, welding seam.*

При моделировании экструдеров для переработки отходов большое внимание уделяется проектированию и испытанию работы шнека – основного рабочего органа, участвующего в процессе измельчения, разогрева и подготовки к формообразованию пластичной массы.

Шнек сжимает массу до точки накопления P_n, после которой возникает возможность создать давление p_1, необходимое для прохода массы через матрицу (рис. 1). Только тогда, когда есть баланс с обеих сторон экструдера, масса может выходить из фильер матрицы. Однако, если условно разбить экструдер на четыре зоны работы, в момент нарастания давления P, Мпа и возникновения максимальной загрузки шнека p кг/м^3 создается максимальная площадка давления (на рис. 1 зона *2*), которая способна деформировать шнек.

В шнековой машине увеличение расхода массы требует увеличения скорости шнека и соответствующего увеличения загрузки шнека материалом. При этом давление (рис. 1) повышается до P_n, поскольку увеличенные скорости подачи приводят на той же самой матрице к увеличенному трению в фильерах матрицы, что так же нежелательно, как и наличие максимально абразивного участка для витков шне-

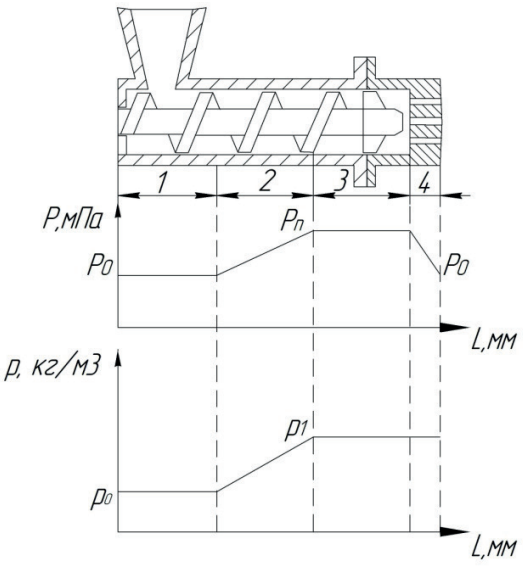


Рис. 1. Схема функционирования экструдера

Рис. 2. Дефекты шнека – разрывы

ка. При технологии изготовления шнека – сварке витков к валу с помощью сварки в CO_2 – наблюдались трещины и отслоения витков шнека (рис. 2).

В ходе проведения операции по формованию RDF-сырья было принято, что на шнек экструдера действуют следующие нагрузки: крутящий момент на валу муфты, создаваемый двигателем, – 5000 Н (рис. 3), температура нагрева сырья внутри экструдера достигает 500 °С. Необходимо определить зоны с наибольшим скоплением нагрузки, перемещения, деформации (табл. 1 и 2).

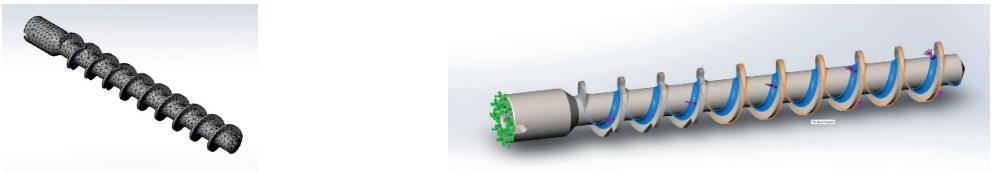


Рис 3. Шнек. Разбиение шнека на сетку по методу конечных элементов с указанием силы действия на шнек

Таблица 1

Результаты трехмерного моделирования и испытаний в Solid Works

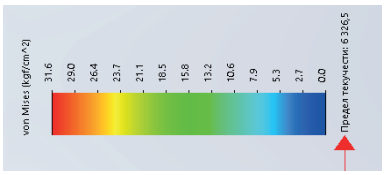
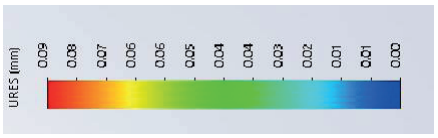
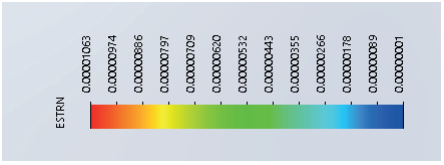
Проверка на напряжение	
Проверка на перемещение	
Проверка на деформацию	

Таблица 2

Результаты испытаний

Витки на шнеке	Заход								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Напряжение, кг/см^2	26,4	16	15,8	13,2	10,6	7,9	5,3	2,7	0
Перемещение, мм	0	0,005	0,015	0,02	0,03	0,05	0,05	0,06	0,09
Деформация, кгс	$886 \cdot 10^{-8}$	$520 \cdot 10^{-8}$	$500 \cdot 10^{-8}$	$530 \cdot 10^{-8}$	$532 \cdot 10^{-8}$	$320 \cdot 10^{-8}$	$266 \cdot 10^{-8}$	$89 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-8}$

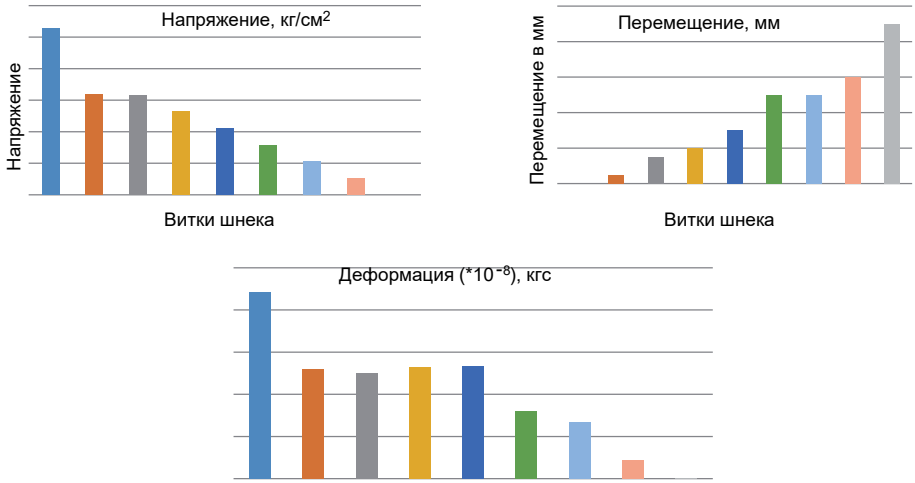


Рис 4. Результаты испытаний

Результаты испытаний представим в виде наглядных графиков (рис. 4).

Таким образом, напряжение и деформация обратно пропорциональны перемещению, что доказывает максимальный коэффициент давления на шнеки в данной области. Следовательно, 7-й и 8-й витки необходимо проваривать с дополнительным ребром жесткости для компенсации напряжений.

Библиографический список

1. *Чистый, И. Н.* Производство гранулированного торфа. Минск, 1980. 420 с.
2. *Kocserha, I.* Effects of Extruder Head's Geometry on the Properties of Extruded Ceramic Products / I. Kocserha, F. Krist ly // Materials Science Forum. Vol. 659 (2010). P. 499–504.
3. *Богатов, Б. А.* Управление процессом разработки торфяных месторождений / Минск.: Выш. шк., 1985. 168 с.
4. *Косов, В. И.* Торф и сапропель – мощный энергетический и геоэкологический потенциал России. Разведка, добыча, переработка полезных ископаемых // Вестник XXI РАЕН. М.: Интермент Инжиниринг, 2005. С. 212–223.
5. *Benbow, J.* Paste Flow and Extrusion / J. Benbow, J. Bridgwater // Clarendon Press. Oxford U.K., 1993. 425 p.
6. *Nikulin, A. N.* The research of possibility to use the machine for biofuel production as a mobile device for poultry farm waste recycling / A. N. Nikulin, S. V. Kovshov, K. V. Epifancev, G. I. Korshunov // Life Science Journal. 2014. 11(4) P. 464–467.
7. *Epifancev, K.* Modeling of peat mass process formation based on 3D analysis of the screw machine by the code YADE / K. Epifancev, A. Nikulin, S. Kovshov, S. Mozer, I. Brigadnov // American journal of mechanical engineering. 1(3). 2013. P. 73–75.
8. *Микаэли, В.* Экструзионные головки для пластмасс и резины: Конструкции и технические расчеты / Пер. с англ. яз.; под ред. В. П. Володина. СПб.: Профессия, 2007. 472 с.
9. *White, J. F.* Extrusion Properties of Non-clay Oxides / J. F. White A. L. Clavel // Amer. Ceram. Soc. Bull. 1963. Vol. 42. № 11. P. 698–702.
10. *Генералов, М. Б.* Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии: учеб. пособие для вузов. Калуга: Изд. Н. Бочкаревой, 2002. 592 с.

УДК 006.91

В. Ш. Сулаберидзе*
доктор технических наук, старший научный сотрудник
А. Г. Чуновкина*
доктор технических наук, старший научный сотрудник
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

О ПРИМЕНЕНИИ ТЕРМИНОВ «КАЛИБРОВКА» И «ПОВЕРКА» СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ В ОТЕЧЕСТВЕННЫХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТАХ

В статье обсуждаются термины, относящиеся к подтверждению соответствия средств измерений метрологическим требованиям: калибровка, верификация, валидация, поверка. Приводятся их определения, данные в действующих нормативных документах. Отмечается существующая неоднозначность определений терминов в различных нормативных документах. Предлагается подход, позволяющий упорядочить применение и определения этих терминов в метрологической практике.

***Ключевые слова**: средство измерений, подтверждение соответствия, метрологические требования, калибровка, верификация, валидация, поверка.*

V. Sh. Sulaberidze*
PhD. Tech., Senior Research Employee
A. G. Chunovkina*
PhD. Tech., Senior Research Employee
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ON THE APPLICATION OF TERMS CALIBRATION AND VERIFICATION OF MEASUREMENT INSTRUMENTS IN DOMESTIC NORMATIVE DOCUMENTS

The terms relating to the confirmation of compliance of measuring instruments with metrological requirements are discussed: calibration, verification, validation. Their definitions are given in the current regulatory documents. The existing ambiguity of definitions of terms in various regulatory documents is noted. An approach is proposed that allows to streamline the use and definitions of these terms in metrological practice.

***Keywords:** measuring instrument, conformity assessment, metrological requirements, calibration, verification, validation.*

В действующих на территории Российской Федерации правовых и технических нормах в области обеспечения единства измерений приводятся определения калибровки, несколько отличающиеся друг от друга. Объективными причинами такого положения являются, во-первых, имеющиеся различия в подходах к способам выражения точности результата измерений в теории погрешности и концепции неопределенности измерений и, во-вторых, более широкая область применения понятия калибровки, обусловливающая неоднозначное описание цели этой процедуры. В данной статье обсуждается лишь вторая из перечисленных выше причин, поскольку различия в подходах к способам выражения точности результата измерений детально рассмотрены в работе [1].

Приведем примеры описания терминов «калибровка» и «поверка» в некоторых действующих на территории России нормативных документах (НД). Для удобства цитаты из НД приведены в таблице.

Из приведенных в таблице цитат следует, что понимание калибровки как процедуры определения действительных характеристик средств измерений (СИ) приведено не только в 102-ФЗ, но и отражено в примечании 3 к ст. 2.39 VIM 3.

Описание терминов «поверка» и «калибровка» в НД

<table>
<tr><th>Калибровка</th><th>Поверка</th></tr>
<tr><td>VIM 3 [2]. Ст. 2.39. Операция, в ходе которой при заданных условиях на первом этапе устанавливают соотношение между значениями величин с неопределенностями измерений, которые обеспечивают эталоны, и соответствующими показаниями с присущими им неопределенностями, а на втором этапе на основе этой информации устанавливают соотношение, позволяющее получать результат измерения исходя из показания.
Примечание 1. Калибровка может быть выражена как утверждение, функция калибровки, диаграмма калибровки, калибровочная кривая или таблица калибровки.
Примечание 2. Калибровку не следует путать ни с регулировкой измерительной системы, часто ошибочно называемой «самокалибровкой», ни с верификацией калибровки.
Примечание 3. Часто только первый шаг в приведенном выше определении понимается как калибровка</td><td>VIM 3 [2]. Ст. 2.44. Верификация, поверка (средства измерений). Предоставление объективных свидетельств того, что данный объект полностью удовлетворяет установленным требованиям.
Примечание 4. В законодательной метрологии ... и в общем при оценке соответствия верификация относится к исследованиям и клеймению и/или выдаче свидетельства о поверке измерительной системы.
Примечание 5. Поверку не следует путать с калибровкой. Не всякая верификация является валидацией</td></tr>
<tr><td colspan="2">VIM 3 [2]. Ст. 2.45. Валидация, аттестация – верификация, при которой установленные требования связаны с предполагаемым использованием</td></tr>
<tr><td>РМГ 29-2013 [3]. Примечание 6 к Ст. 9.2.
Сличение между двумя эталонами может рассматриваться как калибровка, если это сличение используется для проверки и при необходимости для корректировки значения величины, показателей точности (неопределенности) измерений, приписываемых одному из эталонов</td><td></td></tr>
<tr><td>РМГ 29-2013 [3]. Ст. 9.6. Калибровка (средств измерений) – совокупность операций, устанавливающих соотношение между значением величины, полученным с помощью данного средства измерений, и соответствующим значением величины, определенным с помощью эталона с целью определения метрологических характеристик этого средства измерений</td><td>РМГ 29-2013 [3]. 9.9. Поверка (средств измерений) – установление официально уполномоченным органом пригодности средства измерений к применению на основании экспериментально определяемых метрологических характеристик и подтверждения их соответствия установленным обязательным требованиям</td></tr>
<tr><td>Федеральный закон № 102-ФЗ [4]. Термин 10. Калибровка средств измерений – совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик средств измерений</td><td>Федеральный закон № 102-ФЗ [4]. Термин 17. Поверка средств измерений – совокупность операций, выполняемых в целях подтверждения соответствия средств измерений метрологическим требованиям</td></tr>
<tr><td>Федеральный закон № 102-ФЗ [4]. Ст. 18. Средства измерений, не предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, могут в добровольном порядке подвергаться калибровке</td><td>Федеральный закон № 102-ФЗ [4]. Ст. 13. Средства измерений, предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений ... подлежат ... поверке</td></tr>
<tr><td>ГОСТ Р 8.879-2014 [5].
Ст. 1.1. Калибровка средств измерений – совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик средств измерений.
Ст. 4.6. В подразделе «Требования к неопределенностям измерений, определяемых в процессе калибровки» указывают значения целевой неопределенности измерений при калибровке</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025 [6]. Раздел 5.10. В отчетности о результатах калибровки при необходимости указывается значение целевой неопределенности</td></tr>
<tr><td colspan="2">ГОСТ Р ИСО 10012-2008 [7]. Ст. 7.1.1. Метрологическое подтверждение предназначено для подтверждения соответствия метрологических характеристик средств измерений метрологическим требованиям, предусмотренным процессом измерений, включает в себя калибровку, поверку и проверку измерительного оборудования</td></tr>
</table>

Однако помимо этого калибровка может проводиться и в целях верификации и валидации СИ. Определения терминов «верификация» и «валидация» рассмотрим по стандарту ИСО 9000.

Ст. 3.8.4. **Верификация** – подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что установленные требования были выполнены.

Примечание 1. Термин «верифицировано» используется для обозначения соответствующего статуса.

Ст. 3.8.5. **Валидация** – подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что требования, предназначенные для конкретного использования или применения, выполнены.

Примечание 1. Термин «подтверждено» используется для обозначения соответствующего статуса.

Таким образом, валидация более соответствует подтверждению соответствия для конкретного применения, то есть статусу поверки, чем верификация. Это подтверждает и применение термина «валидация» в ГОСТ Р ИСО/МЭК 10012-2008 [7]: ст. 8.3.2 «... процесс измерений перед началом его использования должен быть валидирован».

К аналогичным выводам приводят и тексты из VIM 3 [2]: термин 2.45 и примечание 5 к термину 2.44 (см. таблицу). К этому уместно также добавить, что примечания 4 и 5 к Ст. 2.44 VIM 3 находятся в определенном внутреннем противоречии (см. таблицу).

Соображения о том, что термины «калибровка» и «поверка» несмотря на различия в их определениях не являются взаимоисключающими, высказываются во многих НД. В ГОСТ Р ИСО 10012, например, указано, что калибровка и поверка являются процедурами метрологического подтверждения пригодности СИ для применения в заявленной области измерений/в предполагаемом процессе измерений/в условиях предполагаемого использования. Такая точка зрения представляется нам более уместной, чем высказываемое рабочей группой «по развитию калибровочной деятельности» при СРПП предложение «о рассмотрении калибровки в качестве альтернативы поверке СИ» [9].

Заключение

Калибровка и поверка являются процедурами подтверждения соответствия СИ метрологическим требованиям для применения в заявленной области измерений (в предполагаемом процессе измерений, в условиях предполагаемого использования).

Калибровка СИ является более общим понятием, относящимся к процедурам определения:

1. Действительных метрологических характеристик на основе сравнения с эталоном, стандартным образцом или референтной методикой. Может быть представлена в различных формах, в том числе и разработанных калибровочной лабораторией (см. VIM 3 и ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025).

2. Подтверждения соответствия СИ метрологическим требованиям в заявленной/предполагаемой области применения на основе подтверждения соответствия целевой неопределенности/погрешности. В этом случае калибровка проводится с целью верификации СИ. Оформляется в соответствии с требованиями НД или условиями контракта.

3. Подтверждения соответствия СИ метрологическим требованиям для конкретного применения на основе подтверждения соответствия предельному значению неопределенности/погрешности. В этом случае калибровка проводится с целью валидации СИ. Если требования соответствия предельному значению неопределенности/погрешности носят обязательный характер, то калибровка с целью валидации становится аналогом/синонимом обязательной поверки. Оформляется исключительно в соответствии с требованиями НД.

Поверка СИ, таким образом, является частным случаем калибровки в сферах действия государственного регулирования в области обеспечения единства измерений.

На этом основании не следует противопоставлять калибровку поверке – эти понятия гармонично сосуществуют в системе метрологического подтверждения пригодности СИ. Представляется более логичным принять за аналог поверки СИ не калибровку с целью верификации, а калибровку с целью валидации (см. термин 2.45. VIM 3).

Для исключения путаницы целесообразно учесть рекомендацию, содержащуюся в примечании 2 к Ст. 2.39 VIM 3: «Калибровку не следует путать с регулировкой измерительной системы, часто ошибочно называемой «самокалибровкой». В частности, не следует применять для обозначения процедур автонастройки (корректировка нуля, установка предела измерений СИ и др.) термин «калибровка». Это важно подчеркнуть, так как в эксплуатационной документации СИ довольно часто термин «калибровка» используется для обозначения процедур автонастройки.

Библиографический список

1. *Чуновкина, А. Г.* О количественном выражении точности лабораторных и технических измерений / А. Г. Чуновкина, В. Ш. Сулаберидзе // Измерительная техника. № 12. 2017. С. 69–72.
2. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины (VIM 3) / Пер. с англ. и фр. Всерос. науч.-исслед. ин-т метрологии им. Д. И. Менделеева, Белорус. гос. ин-т метрологии. 2-е изд. испр. СПб.: НПО «Профессионал», 2010. 82 с.
3. РМГ 29-2013. ГСОЕИ. Метрология. Основные термины и определения.
4. Федеральный закон РФ «Об обеспечении единства измерений» № 102-ФЗ.
5. ГОСТ Р 8.879-2014.ГСОЕИ. Методики калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и изложению.
6. ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025-2006. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.
7. ГОСТ Р ИСО 10012-2008. Менеджмент организации. Системы менеджмента измерений. Требования к процессам измерений и измерительному оборудованию.
8. ГОСТ Р ИСО 9000. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.
9. Рабочий доклад по развитию калибровочной деятельности в Российской Федерации. URL: http:/sospp.ru/notices/rabochij-doclad-po-razvitiju-kalibrovochnoj-dejatelnosti-v-rossijskoj-federacii.

УДК 504.75

Н. А. Жильникова*
кандидат технических наук
И. А. Шишкин*
кандидат технических наук
А. А. Баранова*
студент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ЛИКВИДАЦИИ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ РАЗЛИВОВ НЕФТИ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В статье рассмотрены проблемы нефтеразливов в арктической зоне Российской Федерации, пути и методы их решения. Разработаны рекомендации по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций. Предложен алгоритм принятия решений и последовательности действий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций, обусловленных разливами нефти и нефтепродуктов при проведении бункеровочных операций, учитывающий специфику арктических территорий и позволяющий усовершенствовать систему безопасности и быстрого реагирования. Проведена оценка риска возникновения аварий на нефтеналивных судах в Арктике.

***Ключевые слова**: арктическая зона, чрезвычайная ситуация, алгоритм принятия решений, разливы нефти и нефтепродуктов, оценка риска.*

N. A. Zhilnikova*
PhD. Tech.
I. A. Shishkin*
PhD. Tech.
A. A. Baranova*
Student
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

METHODS AND TECHNOLOGIES FOR ELIMINATION AND PREVENTION OF OIL SPILLS IN ARCTIC ZONE OF RUSSIAN FEDERATION

The article deals with the problems of oil spill in the Arctic zone of the Russian Federation, ways and methods for their solution. Recommendations for the prevention and elimination of emergency situations have been developed. The algorithm of decision-making and the sequence of actions for prevention and elimination of emergencies caused by oil spills and oil products during the bunkering operation, taking into account the specifics of Arctic territories and allowing to improve the security and rapid response system, is proposed. An assessment of the risk of accidents at oil tankers in Arctic was carried out.

***Keywords:** arctic zone, emergency, decision-making algorithm, oil and oil product spills, risk assessment.*

Интерес к проблемам арктической зоны значительно усиливается в связи с ее интенсивным хозяйственным освоением. Это приводит не только к положительным, но и к отрицательным последствиям, которые могут быть настолько существенными, что потенциально способны нанести непоправимый ущерб уникальным арктическим экосистемам, нарушить природные условия, ухудшить качество воды, снизить биопродуктивность [1].

Основные положения государственной стратегии РФ освоения арктических территорий изложены в «Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на пери-

од до 2020 года и дальнейшую перспективу» [2] и «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года» [3].

Государственная политика определяет одну из основных целей России в Арктической зоне: сохранение и обеспечение защиты природной среды Арктики, ликвидация экологических последствий хозяйственной деятельности в условиях возрастающей экономической активности и глобальных изменений климата [4].

Реализация стратегической программы действий по охране окружающей среды арктических территорий связана с необходимостью усовершенствования и дальнейшего развития основополагающих законодательных и нормативно-правовых документов природопользования.

В Арктической зоне РФ содержится колоссальное количество неразработанных источников энергоресурсов – нефти и газа. При этом добыча природных ресурсов на территории Арктики крайне сложна и опасна с экологической точки зрения, например, нефтяное загрязнение приводит к деградации ландшафтов, наносит серьезный ущерб речным и морским экосистемам, ухудшает качество питьевой воды и воздуха, губительно влияет на климат. В условиях сурового климата вероятность аварийных ситуаций возрастает. Ликвидация последствий разлива нефти осложняется экстремальными климатическими условиями.

В сибирской части Арктической зоны зимой развивается антициклоническая циркуляция. В этих районах отмечаются очень низкие температуры воздуха, небольшая облачность, незначительное количество осадков и слабые или умеренные ветры. Средние температуры самого холодного зимнего месяца – января – составляют до −45...−50 °С. Минимальные температуры в этих районах иногда снижаются до −55...−60 °С. В результате сильного выхолаживания поверхности в этих районах постоянны инверсии температуры воздуха.

В связи с климатическими особенностями долгое время добыча углеводородов в арктическом регионе выглядела нерентабельно, особенно на фоне огромного количества уже разведанных легкодоступных месторождений нефти и газа. Тем не менее нефтедобыча в Арктике ведется уже более пятидесяти лет, за это время пробурено свыше сотни скважин.

Предотвращение и ликвидация разливов нефти в Арктической зоне РФ (АЗРФ), оценка угроз и ущерба прибрежным территориям предполагают использование новейших технологий и оборудования. Наибольшую сложность в преодолении названных проблем вызывает не материковая часть АЗРФ, а зона шельфа и прибрежные территории.

Природно-климатические условия Арктики бросают вызов технологиям и методам ликвидации последствий разливов нефти. Несмотря на то, что в определенных случаях арктические условия могут быть и благоприятными для ликвидации нефтяных разливов, в большинстве случаев они снижают эффективность методов локализации и ликвидации разливов нефти и работы соответствующего оборудования.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 15.04.2002 г. № 240: «разливы нефти и нефтепродуктов классифицируются как чрезвычайные ситуации» [5].

Основные источники чрезвычайных ситуаций (ЧС), связанных с разливами нефтепродуктов (РН):

– аварии при бурении и испытании скважин;

– аварии при эксплуатации самоподъемных плавучих буровых установок;

– аварии при проведении бункеровочных операций;

– аварии танкеров [6].

Планирование действий по предупреждению и ликвидации ЧС, связанных с РН, проводится с целью заблаговременного проведения мероприятий по предупреждению ЧС, поддержанию в постоянной готовности сил и средств ликвидации ЧС для обеспечения безопасности населения и территорий, а также максимально возможного снижения ущерба и потерь в случае их возникновения.

Последовательность проведения операций по ликвидации ЧС, обусловленной РН, в зависимости от сложившейся ситуации должна выполняться с учетом следующих условий:

– выполнение работ не должно быть связано с угрозой для жизни людей;

– работы по ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов (ЛРН) не должны привести к возникновению новых аварий [7].

Границы зон ЧС при возникновении РН соответствуют максимально возможной площади распространения нефтепродуктов.

Проведение мероприятий по предупреждению и ликвидации ЧС, обусловленных разливами нефти и нефтепродуктов, представляет собой процесс поэтапных действий, направленных на достижение следующих целей:

– локализация источника загрязнения;

– защита береговой и причальной полосы;

– сбор нефтепродукта и транспортировка нефтеводяной смеси к очистным сооружениям;

– ликвидация последствий РН, очистка береговой и причальной полосы [8].

Мероприятия по ликвидации ЧС, обусловленной РН, считаются завершенными после обязательного выполнения следующих этапов:

– прекращение сброса нефтепродуктов;

– сбор разлившихся нефтепродуктов до максимально достижимого уровня, обусловленного техническими характеристиками используемых специальных технических средств;

– размещение собранной нефтеводяной смеси и нефтепродуктов для их последующей переработки и утилизации, исключающее вторичное загрязнение производственных объектов и объектов окружающей природной среды;

– ликвидация загрязнения береговой и причальной полосы.

Для осуществления операций по реагированию на РН на открытой воде оптимальными и наиболее экологически безопасными для окружающей среды технологиями являются механические способы локализации, сбора и удаления нефти с поверхности моря, а также механические способы защиты берегов и особо ценных районов [9].

При реагировании на РН в ледовых условиях наиболее приемлемым вариантом будет сочетание механического сбора нефти с воды подходящими для ледовых условий нефтесборщиками, постоянного контроля за состоянием загрязненного льда вплоть до наступления весеннего периода.

Механический сбор нефти с воды в ледовых условиях подразумевает применение нефтесборных систем, включающих в себя суда ЛРН ледового класса с большим периодом автономности, вспомогательные суда, скоростные катера-бонопостановщики, различные типы боновых заграждений, скиммеры высокой производительности, типы которых соответствуют типам транспортируемой нефти, а также скиммеры, применимые в ледовых условиях.

Необходимая суммарная производительность нефтесборных систем $\sum Q$, участвующих в ликвидации аварии, определяется объемом разлившегося нефтепродукта и заданным временем его сбора. Расчет $\sum Q$ ($м^3$/ч) производится по формуле

$$\sum Q = \sum V / t_{сб},$$

где $\sum V$ – суммарный объем разлитого нефтепродукта, $м^3$; $t_{сб}$ – время сбора основной массы разлившегося нефтепродукта, ч.

Суммарный объем разлившегося нефтепродукта $\sum V$ определяется по формуле

$$\sum V = M_Н / \rho,$$

где $M_Н$ – масса разлившегося нефтепродукта, т; ρ – плотность разлившегося нефтепродукта, $кг/м^3$.

Алгоритм принятия решений и последовательности действий по ликвидации нефтеразливов

Крупномасштабные разливы нефти во время аварий при проведении бункеровочных операций относятся к наиболее частым и опасным по своим последствиям чрезвычайным экологическим ситуациям.

Предполагаемая промышленная деятельность в арктических водах должна проходить тщательную оценку с точки зрения ее потенциального воздействия, оказываемого при нормальном режиме эксплуатации и в случае аварийного разлива нефти.

Местоположение, инфраструктура, эксплуатация и меры безопасности, связанные с любой деятельностью по разведке, добыче, хранению или транспортировке нефти и газа в арктических условиях, должны тщательно проверяться. Наличие фактора задержки реагирования должно четко осознаваться и определяться количественно. Вся эта информация должна быть собрана до момента начала каких-либо инициатив по добыче или транспортировке нефти.

Последовательность и порядок оповещения должны быть прописаны в «Плане ликвидации аварийных разливов нефти» объекта, региона, Федерации [10].

На рисунке представлен возможный алгоритм принятия решений и последовательности действий при проведении мероприятий по ликвидации ЧС, обусловленной РН, в случае возникновения аварий во время выполнения бункеровочных операций.

По результатам анализа существующей системы принятия решений в случае возникновения аварийных ситуаций предложены следующие рекомендации по первоочередным мероприятиям при ликвидации нефтеразливов в арктической зоне:

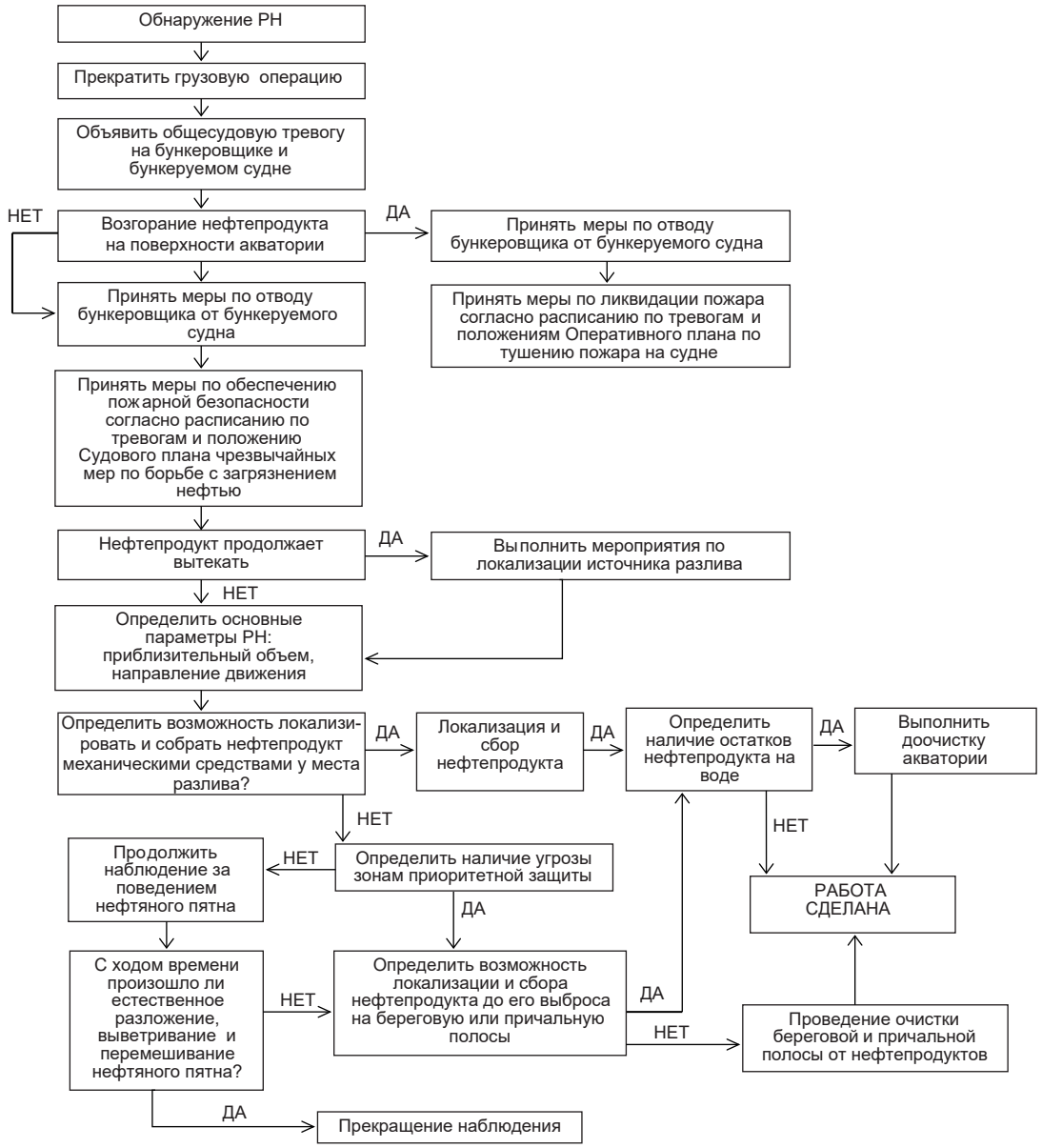
– оповестить соответствующие государственные органы и ответственные лица (например, руководителя организации), а также ближайший морской спасательно-координационный центр (при разливе на море) или Центр управления в кризисных ситуациях МЧС (при разливе на суше или внутренних водных объектах);

– предварительно локализовать пятно нефти с помощью бонового ограждения;

– заделать пробоины;

– перекачать нефть из аварийной цистерны в свободные или не полностью заполненные цистерны;

– применить диспергенты и сорбенты.



Алгоритм принятия решений
и последовательности действий при РН
во время выполнения бункеровочной операции

Процесс принятия решения необходим, чтобы определить срочные и долгосрочные задачи операции по ликвидации разлива, а также индивидуальные действия по ходу ведения работ [11].

Оценка риска возникновения ЧС, обусловленной РН

По классификации Международной федерации владельцев танкеров (ИТОПФ) нефтяные разливы принято делить на три категории в зависимости от объемов утечки нефти (нефтепродуктов): малые – менее 7 т; средние – от 7 до 700 т; большие – более 700 т.

На основании анализа 452 случаев аварий нефтеналивных судов, приведших к крупномасштабным разливам нефти, были установлены следующие основные их причины: 123 посадки на мели (рифы); 126 столкновений; 94 аварии вызваны несовершенством конструкции судна или навигационного оборудования.

Кроме того, 46 танкеров получили повреждения у причалов, у 15 были отмечены поломки двигателя, в 17 случаях имели место пожары и в 31 – взрывы. В ряде случаев аварии обуслов-

лены плохой погодой, техническими неполадками, халатностью и непрофессионализмом персонала.

Величины опасностей, обусловленные авариями нефтеналивных судов, представлены в табл. 1, расчетная частота аварий танкера-бункеровщика – в табл. 2 [12].

Таблица 1

Вероятности проявления опасностей при авариях нефтеналивных судов

№ п/п	Причины аварии	Вероятность аварии
1	Столкновения судов	0,279
2	Посадка на мели (рифы)	0,272
3	Несовершенство конструкции судов или навигационного оборудования	0,208
4	Повреждения у причалов	0,101
5	Взрывы	0,069
6	Пожары	0,038
7	Поломки двигателя	0,033

Таблица 2

Расчетная частота аварий танкера-бункеровщика

№ п/п	Причина навигационной аварии	Частота РН в год
1	Столкновения судов	$1{,}39 \cdot 10^{-4}$
2	Посадка на мели (рифы)	$1{,}36 \cdot 10^{-4}$
3	Несовершенство конструкции судов или навигационного оборудования	$1{,}04 \cdot 10^{-4}$
4	Повреждения у причалов	$5 \cdot 10^{-5}$
5	Взрывы	$3{,}45 \cdot 10^{-5}$
6	Пожары	$1{,}9 \cdot 10^{-5}$
7	Поломки двигателя	$1{,}65 \cdot 10^{-5}$

Из перечисленных причин навигационных аварий одной из наиболее вероятных причин является посадка судна на мель. Следует отметить, что при посадке на мель с повреждением днища судна вероятность вылива 5% груза из поврежденных танков равна 0,5, а вероятность вылива 95% груза равна всего 0,002.

Вероятность вылива 95% груза при столкновении судна бункеровщика с другим судном еще меньше, чем при посадке на мель, так как будет зависеть от местоположения пробоины по отношению к ватерлинии. Поэтому для определения вероятности разгерметизации танков судна бункеровщика примем показатель вероятности вылива 95% груза из поврежденных танков равным 0,002.

Практика проведения погрузочно-разгрузочных операций показывает, что наиболее вероятной аварийной ситуацией при проведении грузовых операций является разрыв грузовых шлангов при перегрузке нефтепродуктов, которая по статистическим данным составляет 10^{-2} на 1 шланг (устройство)/год. При выполнении грузовых операций судами-бункеровщиками задействован 1 шланг.

Составлена таблица показателей риска возникновения аварийных ситуаций по выбранным сценариям (табл. 3) с учетом показателей для трех судов, как максимального количества судов, которые могут осуществлять одновременную бункеровку (табл. 4).

Таблица 3

Расчетная частота аварий по выбранным сценариям

№ п/п	Сценарии	Аварийная ситуация	Показатель риска	Отказ	Тяжесть последствий отказа
1	С1	Разгерметизация двух смежных грузовых танков вследствие столкновения судов	$8{,}4 \cdot 10^{-5}$	Практически невероятный	В
2	С2	Разрыв грузовых шлангов в процессе грузовых операций	$2 \cdot 10^{-4}$	Вероятный	В

Таблица 4

Матрица «вероятность-тяжесть последствий»

Частота возникновения отказа 1/год		Тяжесть последствий отказов			
		Отказ	Критический отказ	Некритический отказ	Отказ с пренебрежимо малыми последствиями
Частый	>1	А	А	А	С
Вероятный	$1–10^{-2}$	А	А	В	С
Возможный	$10^{-2}–10^{-4}$	А	В	В	С
Редкий	$10^{-4}–10^{-6}$	А	В	С	Д
Практически невероятный	$<10^{-6}$	В	С	С	Д

В табл. 3 и 4 применены следующие варианты критериев:

– критерии отказов по тяжести последствий: катастрофический отказ – приводит к смерти людей, существенному ущербу имуществу, наносит невосполнимый ущерб окружающей сре-

де; критический (некритический) отказ – угрожает (не угрожает) жизни людей, приводит (не приводит) к существенному ущербу имуществу, окружающей среде; отказ с пренебрежимо малыми последствиями – отказ, не относящийся по своим последствиям ни к одной из первых трех категорий:

– категории (критичность) отказов: А – обязателен количественный анализ риска или требуются особые меры обеспечения безопасности; В – желателен количественный анализ риска или требуется принятие определенных мер безопасности; С – рекомендуется проведение качественного анализа опасностей или принятие некоторых мер безопасности; Д – анализ и принятие специальных (дополнительных) мер безопасности не требуются.

Для минимизации риска возникновения ЧС в первую очередь необходимо соблюдение требований технических нормативно-правовых актов по промышленной безопасности и постоянный производственный контроль [13].

Мероприятия по предупреждению ЧС:

– организационные мероприятия;

– мероприятия инженерно-технического характера;

– мероприятия специального характера;

– природоохранные мероприятия при транспортировке нефтепродуктов;

– мероприятия по физической защите объекта.

Разработка мероприятий, направленных на предупреждение аварийных разливов нефтепродуктов, должна производиться вовремя и надлежащим образом для своевременного предупреждения и снижения рисков возникновения ЧС.

Библиографический список

1. *Антохина, Ю. А.* Экологическое управление территориальными арктическими природно-техническими комплексами на основе геоинформационных технологий: монография / Ю. А. Антохина, Н. А. Жильникова, Е. Г. Семенова. СПб.: ГУАП, 2017. 237 с.
2. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и на дальнейшую перспективу. Утв. Президентом РФ 18.09.2008 № Пр-1969 // Рос. газ. «Центральный выпуск». 30 марта 2009 г. № 53. URL: http://docs.cntd.ru/document/902149373 (дата обращения: 09.03.2018).
3. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года. Утв. Президентом РФ // «КонсультантПлюс». URL: http://docs.cntd.ru/document/499002465 (дата обращения: 15.03.2018).
4. *Жильникова, Н. А.* Инновации в области экологического мониторинга и моделирования геоэкосистем высокоширотных территорий для обеспечения качества подготовки кадров высшей квалификации / Н. А. Жильникова, И. В. Мателенок, А. О. Смирнов. СПб.: ГУАП, 2017. 180 с.
5. Постановление Правительства РФ от 15.04.02 № 240 «О порядке организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации». URL: http://base.garant.ru/2158681/ (дата обращения: 20.03.2018).
6. *Басарыгин, Ю. М.* Осложнения и аварии при бурении нефтяных и газовых скважин: учебник / Ю. М. Басарыгин, А. И. Булатов, Ю. М. Проселков. М.: Недра, 2000. 679 с.
7. Постановление Правительства РФ от 14 ноября 2014 г. № 1189 «Об организации предупреждения и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на континентальном шельфе Российской Федерации, во внутренних морских водах, в территориальном море и прилежащей зоне Российской Федерации». URL: http://legalacts.ru/doc/postanovlenie-pravitelstva-rf-ot-14112014-n-1189/ (дата обращения: 01.04.2018).
8. *Воробьев, Ю. Л.* Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов / Ю. Л. Воробьев, В. А. Акимов, Ю. И. Соколов. М.: Ин-октаво, 2005. 368 с.
9. ГОСТ 22.0.09-97 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Чрезвычайные ситуации на акваториях. Термины и определения». URL: http://docs.cntd.ru/document/1200001535 (дата обращения: 10.04.2018).
10. Международная конвенция по обеспечению готовности на случай загрязнения нефтью, борьбе с ним и сотрудничеству 1990 года. URL: http://base.garant.ru/2540480/ (дата обращения: 13.04.2018).
11. ГОСТ Р 22.0.05-97 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Термины и определения». URL: http://docs.cntd.ru/document/1200001536 (дата обращения: 15.04.2018).
12. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 года (МАРПОЛ). URL: http://www.idgca.org/doc/app6_020215.pdf (дата обращения: 20.04.2018).
13. ГОСТ Р 22.0.02-2016 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения основных понятий». URL: https://mooml.com/d/gosty/39395/ (дата обращения: 25.04.2018).

УДК 574 (075.8)

Т. В. Колобашкина*
кандидат технических наук, доцент
Л. В. Кайдас*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРЫ В МЕЖДУНАРОДНОМ МАСШТАБЕ

Приведены концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городов России и зарубежных стран, рассмотрены основные показатели качества атмосферного воздуха, установлено расхождение этих показателей в разных странах, что не позволяет получить сопоставимые результаты оценки качества атмосферы в глобальном масштабе. Проведена оценка риска здоровью населения при концентрациях загрязняющих веществ, соответствующих допустимым нормативам США.

***Ключевые слова**: атмосферный воздух, загрязняющие вещества, предельно допустимая концентрация, риск, приемлемый риск.*

T. V. Kolobashkina*
PhD. Tech., Associate Professor
L. V. Kaidas*
Postgraduate Student
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

PROBLEMS OF ASSESSING THE QUALITY OF THE ATMOSPHERE ON AN INTERNATIONAL SCALE

The concentrations of pollutants in the air of Russian and foreign cities are given, the main indicators of air quality are considered, the discrepancy of these indicators in different countries is established, which does not allow to obtain comparable results of assessing the quality of the atmosphere on a global scale. The assessment of health risk at the concentrations of pollutants corresponding to the permissible standards of the USA is carried out.

***Keywords:** atmospheric air, pollutants, maximum permissible concentration, risk, acceptable risk.*

Воздушная среда является наиболее подвижной из всех природных сред. Вещества, способные существовать в атмосфере в течение длительного времени без изменений, обнаруживаются повсеместно на нашей планете и называются глобальными загрязняющими веществами.

Установлено, что качество атмосферного воздуха влияет на здоровье и благополучие человека. Проблема загрязнения воздуха наиболее актуальна для крупных городов, в которых степень загрязнения воздуха автомобильным транспортом и промышленными предприятиями может быть очень высокой.

Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) определила группу примесей, которые следует контролировать в первую очередь. Это диоксид серы, оксиды азота, оксид углерода, углеводороды (в том числе бензапирен), тяжелые металлы.

Степень воздействия загрязнений атмосферы на растения, животных и человека зависит от *концентрации загрязняющего вещества*.

Концентрации некоторых загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городов России и других стран приведены в табл. 1 [1].

Пути ограничения загрязнения природной среды:

– соблюдение санитарно-гигиенических требований;

– установление норм для предельных выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду;

Таблица 1

Концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, мкг/м^3

Вещество	Россия	Другие страны	
	Концентрация, мкг/м^3	Города	Концентрация, мкг/м^3
Взвешенные вещества	192,1	Города Европы	10–150
		Города США	40–90
		Лиссабон	90–160
		Сидней	90–150
		Калькутта	270–550
Диоксид азота	46,8	Афины	194
		Барселона	122
		Лондон	121
Диоксид серы	–	Афины	74
		Барселона	42
		Лондон	41
		Париж	37
		Кельн	61
Бензол	90	Крупные города Европы	До нескольких сотен
Бензапирен	1,5	Города США	1–5
Свинец	0,1	Калифорния и Бельгия	170–200
Водород фтористый	7,5	Города США	0,02–2
		Города Германии (вблизи промышленных центров)	0,5–3,8
Аммиак	25	Города Европы	До 20
Оксид углерода	1,52	Города Европы	До 20

– всесторонний контроль природной среды.

В большинстве стран мира основные критерии качества воздуха основаны на санитарно-гигиеническом нормативе – предельно допустимой концентрации (ПДК) загрязняющих веществ.

В России для атмосферного воздуха установлены два вида предельно допустимых концентраций [2]:

– максимальная разовая (ПДК$_{м.р}$). Время, на которое установлен норматив, – 20 минут;

– среднесуточная (ПДК$_{с.с}$). Время, на которое установлен норматив, – 24 часа.

Среднесуточные предельно-допустимые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, принятые в России [3], и нормативы (рекомендации) США, установленные на время 24 часа [1], представлены на рис. 1

В результате анализа данных, приведенных на рис. 1, можно сделать вывод о расхождении значений ПДК загрязняющих веществ в атмосферном воздухе России и нормативов США.

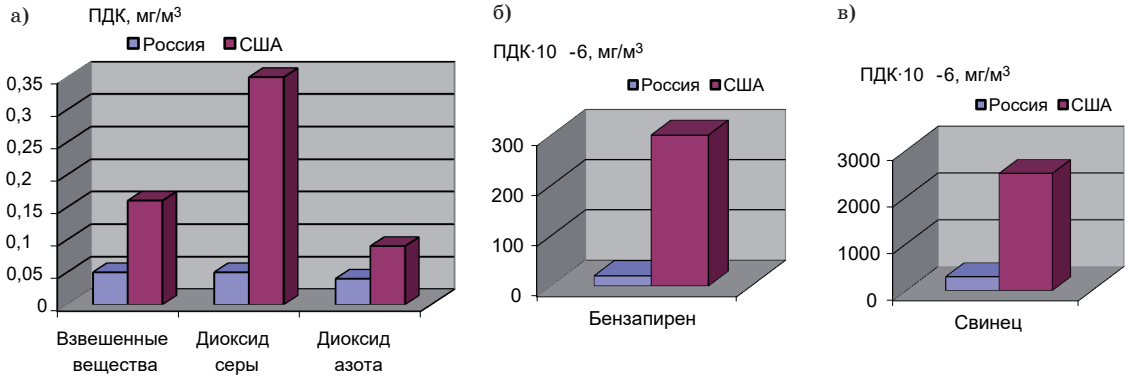


Рис. 1. ПДК$_{с.с}$ загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, принятые в России, и нормативы США, установленные на время 24 часа

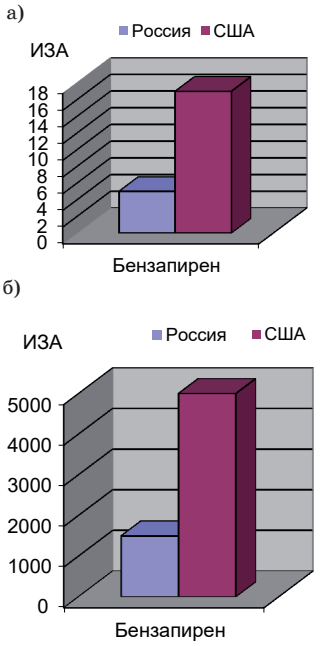


Рис. 2. Уровень загрязнения атмосферного воздуха бензапиреном в России и США относительно нормативов, установленных в США (а), и нормативов ($ПДК_{с.с}$), установленных в России (б)

Для оценки степени загрязнения атмосферы отдельными примесями используются единичные индексы загрязнения атмосферы (ИЗА), представляющие собой значение максимальной разовой или среднесуточной концентрации C_i загрязняющего вещества, нормированной на $ПДК_i$ соответствующего периода осреднения [4],

$$ИЗА = C_i / ПДК_i. \quad (1)$$

Индекс загрязнения атмосферы бензапиреном в России и США представлен на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что уровень загрязнения атмосферного воздуха бензапиреном:

– относительно нормативов, установленных в США, в России ИЗА = 5, в США ИЗА = 17;

– относительно нормативов, установленных в России, в России ИЗА = 1500; в США ИЗА = 5000.

Расхождение в ПДК загрязняющих веществ не позволяет сравнить уровни загрязнения атмосферы в различных странах, получить сопоставимые результаты, необходимые для оценки качества атмосферы как в глобальном, так и в национальном масштабах и для разработки эффективных мероприятий по его регулированию.

В настоящее время ПДК – важнейший стандарт качества природной среды. Концентрация поступающих в атмосферный воздух загрязняющих веществ не должна превышать ПДК, т. е. не должна представлять опасности для здоровья человека. Соблюдение санитарно-гигиенических требований – основной критерий в России.

Оценим риск для здоровья населения, который возникает при концентрациях загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, соответствующих нормативам США, установленным на время 24 часа.

В качестве потенциальных химических канцерогенов рассмотрим вещества, относящиеся к группам 1, 2А, 2В по классификации Международного агентства по изучению рака (МАИР).

Для ингаляционного поступления единичный канцерогенный риск UR_i рассчитывается по формуле [5]

$$UR_i = \frac{SF_i \cdot 20}{70}, \quad (2)$$

где SF_i – фактор канцерогенного потенциала при ингаляционном воздействии; 20 $м^3$/сут – средний суточный объем дыхания; 70 кг – средняя масса тела взрослого человека.

Информация о показателях опасности химических канцерогенов приведена в табл. 2 [5].

Таблица 2

Сведения о показателях опасности развития канцерогенных эффектов

Вещество	Ингаляционное воздействие		
	МАИР	*SFi*, $(мг/кг·сут)^{-1}$	*URi*, риск на 1 $мг/м^3$
Бензапирен ($C_{20}H_{12}$)	2А	3,9	1,114
Свинец (Pb)	2А	0,042	0,012

Примечание: А – вещества канцерогенные или вероятно канцерогенные для человека (гр. 1 – 2 по МАИР).

Спектр неблагоприятных эффектов, вызываемых химическими веществами, чрезвычайно широк. Неканцерогенные эффекты могут проявляться в виде раздражающего действия на дыхательную систему, различных общетоксических (в отношении печени, почек и других жизненно важных органов и систем организма), изменения состояния ЦНС, нарушения репродуктивной функции. При оценке риска развития неканцерогенных эффектов используются референтные уровни воздействия (референтные дозы и концентрации). При отсутствии референтной концентрации в качестве ее эквивалента возможно применение ПДК.

Контакт организма с химическим веществом характеризуется дозой, определяемой как усредненное количество вещества, поступивше-

го в организм человека (в мг на 1 кг веса тела в среднем за день).

Среднесуточная доза химического вещества, попавшего в организм человека при дыхании в загрязненном воздухе, определяется по формуле [5]

$$I = \frac{\left(C \cdot T_{out} \cdot V_{out} + C_h \cdot T_{in} \cdot V_{in}\right) \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT \cdot 365}, \quad (3)$$

где C – концентрация вещества в атмосферном воздухе, мг/м^3; T_{out} – время, проводимое вне помещения, час/день; V_{out} – скорость дыхания вне помещения, м^3/час; C_h – концентрация вещества в воздухе жилища, мг/м^3 $(C_h=C_A)$; T_{in} – время, проводимое внутри помещения, час/день; V_{in} – скорость дыхания внутри помещения, м^3/час; EF – частота воздействия, дней/год; ED – продолжительность воздействия, лет; BW – масса тела, кг; AT – период усреднения экспозиции, лет.

Для канцерогенных эффектов дозы представляют в виде пожизненных среднесуточных доз, рассчитанных по формуле (3) при условии $AT = 70$ лет.

Хроническая среднесуточная доза рассчитывается по формуле [5]

$$I_{ch} = I \cdot \frac{EF}{DPY},$$

где EF – частота воздействия, дней/год; DPY – число дней в году (365 дней/год).

Если $EF = 365$ дней/год, то $I_{ch} = I$.

В случае канцерогенных воздействий риски выражаются вероятностью заболевания раком в течение всего периода жизни (70 лет).

Ингаляционный индивидуальный канцерогенный риск *(Risk)* в течение всей жизни [5]

$$Risk = I_{ch} \cdot SF_i \,. \quad (4)$$

Стандартные значения параметров формулы (3) приведены в табл. 3. Результаты расчета среднесуточных доз по формуле (3) и индивидуального канцерогенного риска по формуле (4) приведены в табл. 4.

Риск развития неканцерогенных эффектов для отдельных веществ оценивался на основе расчета коэффициента опасности HQ [5]

$$HQ = \frac{AC}{RFC}, \quad (5)$$

где AC – концентрация вещества, мг/м^3; RFC – референтная концентрация, мг/м^3.

При комбинированном воздействии нескольких химических веществ на одни и те же органы или системы организма наиболее вероятным типом их комбинированного влияния является суммация. Поэтому риск развития неканцерогенных эффектов оценивался на основе расчета индекса опасности HI

$$HI = \sum_i HQ_i \,. \quad (6)$$

Результаты расчета индексов опасности с учетом (5), (6) и критических органов, поражаемых исследуемыми веществами, приведен в табл. 5.

Значение приемлемого уровня индивидуального риска для населения оценивается как 10^{-6} [5]. Из данных, приведенных в табл. 4, следует, что при концентрациях загрязняющих веществ, рекомендованных в США в качестве предельно допустимых на время 24 часа, индивидуальный канцерогенный риск равен 10^{-3}. Согласно [5] это соответствует уровню риска – среднему, допустимому для производственных условий, но недопустимому для населения.

Таблица 3

Стандартные значения величин для расчета среднесуточной дозы химического вещества, попавшего в организм человека при дыхании

Параметр	Стандартное значение
T_{out}, ч/день	8
V_{out}, м^3/ч	1,4
C_h, мг/м^3	$C_h=C_A$
T_{in}, ч/день	16
V_{in}, м^3/ч	0,63
EF, дней/год	350
ED, лет	30
BW, кг	70
AT, лет	канцерогены – 70

Таблица 4

Оценка канцерогенного риска

Вещество	Нормативы концентрации загрязняющих веществ, установленные в США, мг/м^3	Среднесуточная доза I, мг/кг·сутки	Фактор канцерогенного потенциала SFi	$Risk$
Бензапирен	$3 \cdot 10^{-4}$	$3{,}75 \cdot 10^{-5}$	3,9	$1{,}46 \cdot 10^{-4}$
Свинец	$25 \cdot 10^{-4}$	$31{,}2 \cdot 10^{-5}$	0,042	$0{,}13 \cdot 10^{-4}$
Суммарный индивидуальный канцерогенный риск				$1{,}59 \cdot 10^{-4}$

Таблица 5

Оценка неканцерогенного риска

Вещество	Референтная концентрация, установленная в России, мг/м^3	Нормативы (рекомендации) концентрации загрязняющих веществ, установленные в США на время 24 ч, мг/м^3	Коэффициент опасности *HQ*	Критические органы и системы
Диоксид азота (NO_2)	0,04	0,08	2	Органы дыхания
Диоксид серы (SO_2)	0,05	0,35	7	Органы дыхания
Взвешенные вещества	0,05	0,15	3	Развитие, органы дыхания
Бензапирен ($C_{20}H_{12}$)	0,000001	0,0003	300	Развитие
Свинец (Pb)	0,0005	0,0025	5	Развитие, почки, кроветворная система
Суммарный риск		*HI* общий	330	
		HI развитие	308	
		HI органы дыхания	12	
		HI почки	5	
		HI кроветворная система	5	

Из данных табл. 5 следует, что по всем веществам получены неприемлемые коэффициенты опасности $HQ_i > 1$. При сохранении существующего уровня воздействия будут существовать неканцерогенные эффекты, т. е. заболеваемость (не связанная с раком) населения значительно превысит средний уровень.

Таким образом, при концентрациях загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, соответствующих нормативам США:

– существует недопустимый для населения риск развития канцерогенных эффектов;

– заболеваемость, не связанная с раком, значительно превысит средний уровень. Загрязняющие вещества оказывают влияние на развитие, органы дыхания, почки и кроветворную систему.

Обеспечение эффективности глобального мониторинга окружающей природной среды возможно только при сопоставимости результатов оценки качества атмосферы. Поэтому одной из важнейших задач является создание согласованных систем ПДК и методов их контроля в международном масштабе.

Библиографический список

1. Письмо Минздрава РФ от 07.08.1997 № Н/109-111 «Об информационном письме, о списке приоритетных веществ, содержащихся в окружающей среде и их влиянии на здоровье населения». Документ по состоянию на август 2014.
2. ГОСТ 17.2.1.03-84. Охрана природы (ССОП). Атмосфера. Термины и определения контроля загрязнения.
3. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Гигиенические нормативы. ГН 2.1.6.1338-03. Ориентировочно безопасные уровни воздействия (ОБУВ) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Гигиенические нормативы. ГН 2.1.6.1339-03. М., 2003.
4. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. РД 52.04.186-89. М., 1991. 693 с.
5. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду (Р2.1.10.1920-04). М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. 143 с.

УДК 504.064.3

И. А. Шишкин*
кандидат технических наук, доцент
Н. А. Жильникова*
кандидат технических наук, доцент
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

УНИФИЦИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ ПРИРОДНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

В статье приведены методы и средства нормирования техногенной нагрузки для природно-производственных комплексов.

***Ключевые слова**: нормирование, техногенная нагрузка, производственный комплекс, ранжирование, функциональная модель, ГИС-проект.*

Ilia Shishkin*
PhD. Tech., Associate Professor
Natalia Zhilnikova*
PhD. Tech., Associate Professor
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

STANDARDIZED METHODS AND TOOLS FOR REGULATION OF ANTHROPOGENIC LOAD FOR NATURAL-INDUSTRIAL COMPLEXES

The article presents methods and means of rationing technogenic load for natural-industrial complexes.

***Keywords:** regulation, industrial impact, industrial complex, ranking, functional model, GIS project.*

На регионально-бассейновом уровне при межотраслевом подходе решения задач нормирования техногенной нагрузки возникает необходимость в унификации методов с использованием геоинформационных технологий. В этом случае требуется создание взаимосвязанных моделей природно-производственных комплексов в рамках бассейновых норм допустимых воздействий и схем комплексного использования и охраны водных объектов.

Модели такого рода позволяют унифицировать методы принятия решений при имитационном моделировании как в рамках отдельных высокотехнологичных производственно-технических комплексов различных отраслей производства, так и в рамках инновационного развития территориально-производственных систем с учетом современных условий государственного строительства и требований природоохранного законодательства и региональных природных условий и особенностей.

Унификация характеризуется большой научной актуальностью и практической значимостью, в первую очередь это касается создания единой базы данных и базы знаний для бассейновых природно-технических отдельных отраслей, особенно базовых высокотехнологичных, а также межотраслевых природно-производственных комплексов. Это будет способствовать оптимальному территориально-бассейновому перераспределению нагрузки на окружающую среду между высокотехнологичными отраслями с учетом критериев экологичности и заданных экологических стандартов.

Разработанные к настоящему времени для отдельных отраслей промышленности информационно-технические справочники (ИТС) по наилучшим доступным технологиям (НДТ) могут внедряться для территориально производственных комплексов (ТПК) на основе системного анализа взаимных связей всех производственных объектов в заданных природных условиях в своем неразрывном единстве.

Недостаточная системность взаимосвязи технологического и экологического нормирования на уровне нормативно-правовых и методиче-

ских документов (предельно допустимые концентрации (ПДК) – нормы допустимых сбросов (НДС) – нормы допустимых воздействий (НДВ) – схемы комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО) предопределяет необходимость построения соответствующего алгоритма и программно-технических средств реализации.

Для проектов НДВ недоработан вопрос обоснования целевых показателей и оценки экологического состояния водных объектов. Кроме этого отсутствуют рекомендации по согласованному обоснованию индивидуальных для предприятий НДС в рамках бассейновых НДВ.

В действующих методических указаниях по НДВ не рассматриваются трансграничные речные бассейны, что противоречит бассейновому принципу комплексного использования и охраны водных объектов и международным обязательствам по трансграничным речным бассейнам.

Для водопользователей, расположенных в пределах водохозяйственного участка, расчет НДС осуществляется на основе НДВ при соблюдении баланса загрязняющих веществ. Однако это зачастую невозможно, так как методы расчета НДВ и НДС принципиально отличаются. Во-первых, расчет НДС в отличие от НДВ осуществляется с учетом ассимилирующей способности водного объекта, а во-вторых, расчет НДВ для веществ двойного генезиса (распространенных в природных водах как по естественным причинам, так и в результате антропогенного воздействия) осуществляется на основе региональных нормативов качества вод, а расчет НДС – на основе ПДК.

При обосновании нормативов допустимого сброса (НДС) по действующей методике используется подход, связанный с ограничением загрязнения водотоков и водоемов на основе предельно допустимых концентраций (ПДК), рекомендованных в масштабах государства. Отличительной особенностью такого подхода к нормированию является единообразие для всей территории страны и постоянство во времени норм качества воды, зависящих только от вида водопользования. При этом не учитываются различные временные и природные условия формирования качества вод водных объектов.

Исходя из названия, методика расчета НДС предназначена для водопользователей, но какой водопользователь будет проводить расчеты для всего водохозяйственного участка, на котором расположено множество и других водопользователей? При этом должно быть соблюдено оптимальное распределение массы сбрасываемых веществ между водопользователями, сбрасывающими сточные воды. В методике не прописано, кто осуществляет расчеты для водохозяйственного участка и по каким критериям квотируется распределение нагрузки.

Самое слабое звено в методике расчета НДС – это отсутствие указаний на установление лимитов на сброс загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей. Совершенно очевидно, что для большинства водопользователей установленные НДС не могут быть соблюдены по ряду причин. В методике ничего не сказано, как, на какой срок и при каких условиях для водопользователей устанавливаются лимиты на сброс. В этом случае у водопользователей пропадает необходимость разработки текущих и перспективных планов рационального использования и охраны водных ресурсов.

Расчет величин НДС предполагается осуществлять отдельно по месяцам и в целом за год. Однако для этого недостаточно иметь ежемесячные фоновые показатели качества вод водного объекта, необходимы также данные о качестве сточных вод за каждый месяц. Такие данные о сточных водах отсутствуют в государственной статистической отчетности водопользователей в форме 2ТП-водхоз. Более того, в самой методике говорится, что фактическое содержание загрязняющих веществ в сточных водах определяется как среднеарифметическое значение концентрации за год.

В методике предлагается совершенно неприемлемый для рыночных условий принцип расчета величин НДС на водохозяйственном участке. Расчет осуществляется при оптимальном распределении массы сбрасываемых веществ между отдельными водопользователями. При этом критерием оптимальности является минимум суммарных приведенных затрат на достижение НДС на водохозяйственном участке.

В соответствии с водным законодательством расчет НДС должен осуществляться с учетом наилучших доступных технологий (НДТ), вместо этого в методике говорится, что «при расчете НДС необходимо учитывать технико-экономические характеристики производства, системы очистки, а также оборотного или повторного использования воды каждой конкретной организации».

Ликвидация имеющихся разрывов между обширной законодательной базой нормирования и техногенным воздействием на водные объекты и информационно-техническим и программным обеспечением этой базы при решении практических задач требует новых методов и соответствующих методик для поддержки принятия управляющих решений.

Это особенно четко проявилось при экспертной оценке результатов государственной экологической экспертизы множества региональных проектов НДВ и СКИОВО за последние четыре года. Указанные выше проблемы в той или иной степени были отмечены государственной комиссией практически в каждом проекте.

Отмечено, что в отдельных проектах нереальные нормы и цели приводят к нереализуемым программам и проектам. Это показывает необходимость развития регионально-бассейновых межотраслевых информационно-аналитических центров, которые обеспечили бы сопровождение дорогостоящих бассейновых проектов НДВ и СКИОВО на стадии разработки технических заданий на реальной информационной основе, непосредственно при разработке проектов; а для СКИОВО особенно важно выполнить сравнительную социально-экономическую оценку вариантов программ мероприятий, в том числе реальную оценку финансовых затрат, объемов экономии водных ресурсов, объемов предотвращенных ущербов и других выгод, и улучшения качества жизни в рассматриваемом бассейне, экологическую и социальную приемлемость каждого из вариантов программы мероприятий и мероприятий в основе программы. При этом комплексная (интегральная) оценка каждого варианта программы мероприятий осуществляется с учетом финансово-экономических, экологических и социальных факторов. Особое внимание должно быть уделено обоснованию реальности их поэтапной реализации в установленные сроки на основании оценок имеющихся водных ресурсов, финансовых ресурсов, промышленного, интеллектуального, социального, культурного и кадрового потенциала, территории рассматриваемого бассейна.

На основе имеющейся базы данных и базы знаний по бассейну разрабатываемая в «Схеме» система индикаторов достижения устанавливаемых целевых показателей должна учитывать объективную временную задержку эффекта от реализации водохозяйственных и водоохранных мероприятий.

Все наиболее крупные бассейновые проекты НДВ, НДС и СКИОВО должны в рамках мониторинга их реализации иметь систему индикаторов достижения установленных целевых показателей; порядок получения данных о ходе реализации бассейновых мероприятий; порядок оценки эффективности реализованных мероприятий и достижения целевых показателей; порядок прогнозирования эффективности мероприятий, подлежащих реализации, и сроков достижения целевых показателей; комплекс электронных ситуационных, оценочных, исполнительных и прогнозных карт на геоинформационной основе в соответствии с требованиями к техническим и программным средствам ведения слоев цифровой картографической информации.

Программные средства проектов должны быть совместимы с программными средствами государственного водного реестра и государственного мониторинга водных объектов.

Бассейновый подход затрагивает различные отрасли хозяйства региона, его природные ресурсы и требует проведения единой технической и социальной политики с соответствующим эколого-экономическим обоснованием при использовании наиболее прогрессивных производственных (соответствующих НДТ) и информационных технологий и оборудования.

В соответствии с Водным кодексом РФ и внесенными в него изменениями в 2015 г., а также отдельными законодательными актами Российской Федерации предусматривается для основных водных бассейнов совершенствование и внедрение системы нормирования сброса сточных вод, основанной на нормативах допустимых воздействий (НДВ) на водные объекты, учитывающих региональные (природные) особенности формирования качества вод, их целевое использование и текущую совокупную антропогенную нагрузку.

Кроме того, приоритетным направлением Водной стратегии РФ по развитию водохозяйственных комплексов (ВХК) является совершенствование системы государственного управления ВХК, включая совершенствование нормативной правовой базы, а также программных средств и новых методов в сфере использования и охраны водных объектов. В первую очередь это относится к разработке НДВ на поверхностные водные объекты и в определении допустимых сбросов (НДС) загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей, т. е. в определении условий отведения сточных вод.

Нормирование качества воды заключается в установлении совокупности допустимых значений показателей состава и свойств воды водных объектов, в пределах которых надежно обеспечивается здоровье населения, благоприятные условия водопользования и экологическое благополучие водного объекта.

Нормирование условий отведения сточных вод для каждого водопользователя сводится к расчету величины НДС, которая является определяющим фактором экономического воздействия на водопользователей в целях повышения эффективности использования водных ре-

сурсов и степени очистки сточных вод. Их разработка в настоящее время осуществляется на основании «Методики разработки НДС веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей».

Согласно п. 20 указанной Методики НДС должны разрабатываться на основе и в соответствии с НДВ на водные объекты, подготовленными на основании «Методических указаний по разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты» [1, 19]. Однако применение указанных нормативных документов при реализации проектов нормативов допустимых воздействий и схем комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО) на уровне государственной экологической экспертизы выявило ряд существенных недостатков, связанных с их недоработкой и неоднозначным толкованием отдельных положений водного законодательства, правовых и нормативно-методических документов, регламентирующих разработку указанных проектов.

Наряду с перечисленными проблемами системы нормирования сбросов, НДВ на водные объекты и НДС для водопользователей в соответствии с действующими методиками [1] предписывается устанавливать исходя из общефедеральных нормативов качества воды (ПДК, ОДУ или ОБУВ химических веществ), зависящих только от вида водопользования и не учитывающих региональные природно-географические условия их формирования и фактическое состояние (антропогенное загрязнение).

При нормировании сбросов в водные объекты нескольких веществ одного ЛПВ достаточно часто допустимые к сбросу концентрации загрязняющих веществ в сточных водах оказываются на порядок ниже ПДК, предъявляемых к качеству воды водных объектов рыбохозяйственного назначения.

Для того чтобы действующая система нормирования сбросов сточных вод в водные объекты в полной мере решала поставленные перед ней задачи и соответствовала законодательной базе, необходимо усовершенствовать действующие нормативно-методические документы, касающиеся разработки НДВ на водные объекты и НДС для водопользователей. Предлагаемая авторами для территориального природно-технического комплекса (ТПТК) математическая модель конвективно-диффузионного переноса и превращения веществ (КДПиПВ) и ее модификации для конкретных водоемов [7, 16] с целью расчета НДВ учитывает аккумулирующую емкость водных объектов, а также совокупное воздействие на формирование качества поверхностных вод всех сосредоточенных и распределенных источников загрязнения, включая диффузные.

Применение геоинформационных технологий и систем позволяет перейти к региональному нормированию качества поверхностных вод в зависимости от физико-географических условий их формирования и к разработке НДС на основе бассейнового принципа расчета. Это в свою очередь позволит каждому водопользователю использовать определенную долю аккумулирующей емкости и самоочищающей способности водного объекта. В настоящее время водопользователи, расположенные ниже по течению, несут, как правило, большие финансовые затраты на очистку как сточных, так и природных вод, чем водопользователи, расположенные выше по течению реки.

Реализация новой методики квотирования нагрузки для каждого субъекта территориального природно-технического комплекса позволяет комплексно учесть эколого-технологические критерии нормирования и реализации принципа наилучших доступных технологий (НДТ) для основных технологических и вспомогательных производств.

Однако в соответствии с расчетными квотами нагрузки на водный объект в рамках НДВ каждый водопользователь должен платить только за собственное загрязнение водных объектов.

Опыт разработки проектов бассейновых НДВ для различных регионов России показал необходимость разработки специальной методики выбора перечня приоритетных нормируемых целевых показателей качества воды водных объектов, учитывающей природные особенности водных объектов и все виды водопользования.

В работе рассмотрена структура функциональной модели (рис. 1) для определения бассейновых НДВ и индивидуальных НДС на основе частного моделирования для конечных участков и видов воздействия с применением геоинформационного комплекса («ГИМС – река») [24]. Данный комплекс предназначен для получения различных сценариев развития гидрометеорологической и водохозяйственной обстановки, а также позволяет моделировать гидрологические процессы формирования речного стока; функционирование водохозяйственных систем; изменение количественных и качественных показателей состояния водных объектов, затопления и подтопления территорий.

Функциональная модель (ФМ) территориального природно-технического комплекса (ТПТК) позволяет взаимоувязать интересы всех субъектов ТПТК на единой законодательной

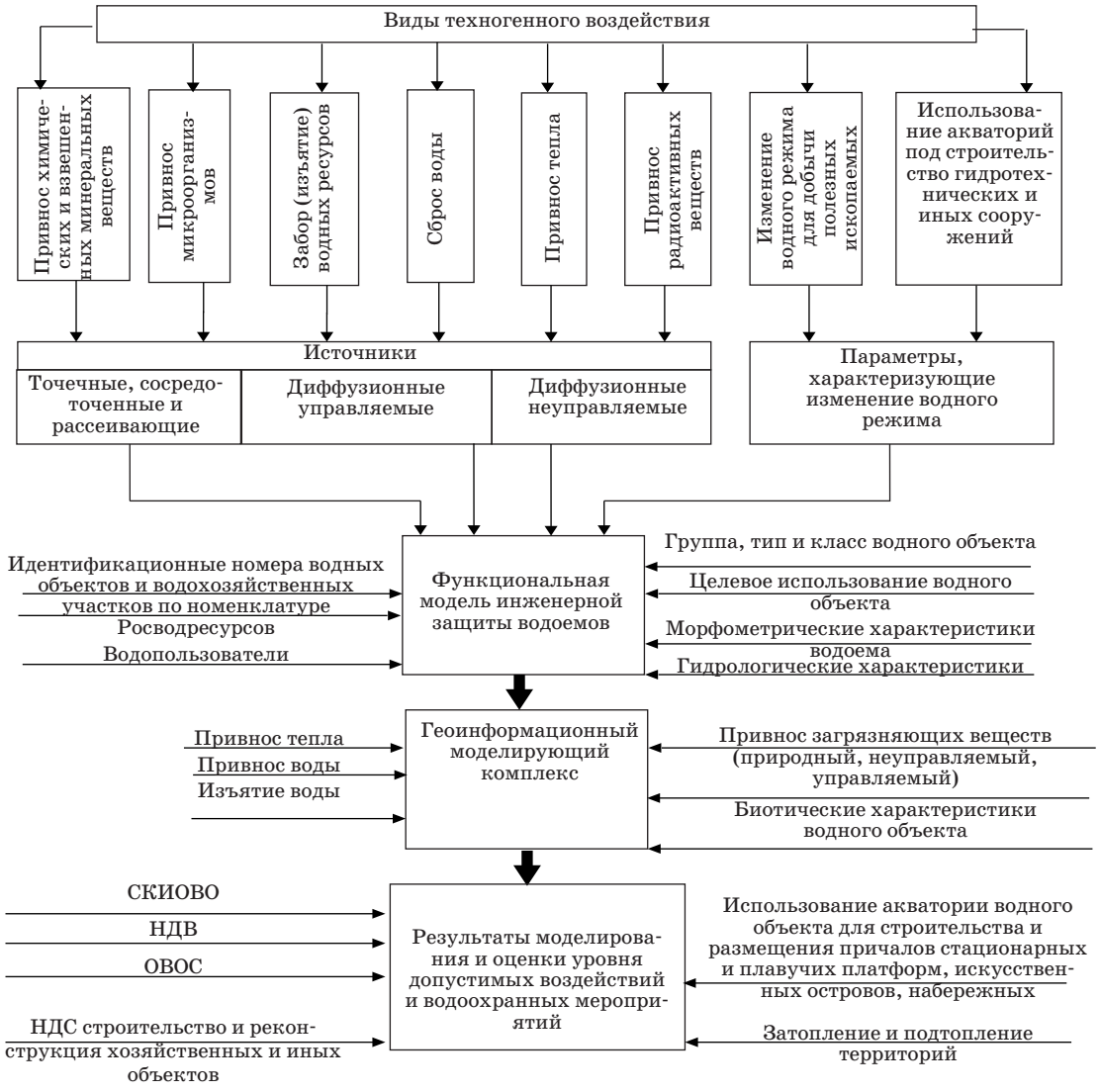


Рис. 1. Схема функциональной модели защиты водных объектов от техногенных воздействий

базе по всему речному бассейну или его участку в соответствии с гидрографическим и водохозяйственным районированием. В рамках ФМ обеспечивается устойчивое функционирование естественных или сложившихся экологических систем при минимизации последствий антропогенных воздействий с учетом природно-климатических особенностей водных объектов данного региона. Функциональная модель позволяет регламентировать в пределах отдельных водохозяйственных участков изменения хозяйственной деятельности и, соответственно, природно-техногенной обстановки с заданным временным шагом.

ГИС-проект нормирования допустимых сбросов базовых высокотехнологичных производств основывается на следующем:

– определение основных компонент геоинформационной системы;

– разработка программ расчета конвективно-диффузиозного переноса и превращения загрязняющих веществ;

– разработка алгоритма экспорта поля концентраций загрязняющих веществ;

– разработка алгоритма экспорта поля концентраций загрязняющих веществ на геоинформационную основу;

– внедрение геоинформационной моделирующей системы для территориальных высокотехнологичных природно-технических комплексов с целью оптимизации перераспределения техногенной нагрузки по критериям уровня экологичности;

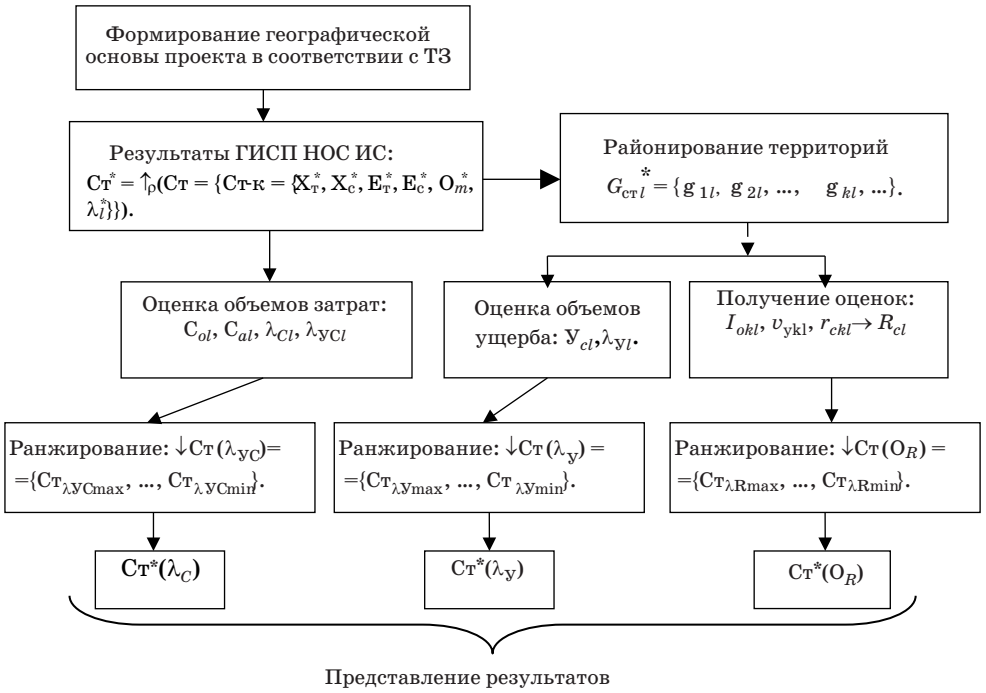


Рис. 2. Логика формирования ГИС-проекта РИС СО

– разработка и реализация требований к картографической основе и непосредственно ее структуры;

– разработка и реализация структуры базы данных и баз знаний;

– стыковка геоинформационной системы с базой данных и математической моделью.

Особенностью новой версии ГИС-проекта «НДВ-НДС» является возможность проводить оценку влияния отдельных субъектов ТПТК на целевые показатели качества воды на разных стадиях проектирования и эксплуатации, а также непосредственно с картографической основы получать необходимую атрибутивную информацию об уровнях различных режимов сброса и уровнях НДС. С учетом фактически сложившейся ситуации по ТПТК ГИМС позволяет увязать бассейновые НДВ на водные объекты с НДС для индивидуальных водопользователей и автоматизировать обработку результатов имитационного моделирования.

Формирование ГИС-проекта для оценки и предотвращения подтопления территорий

ГИС-технология позволяет при решении территориальных задач прогнозирования и нормирования техногенной нагрузки комплексно и системно исследовать основы и инструментарий минимизации рисков предотвращения подтоплений территорий (ППТ) в зоне планируемого размещения и развития базовых высокотехнологичных отраслей производств (БВОП). Ниже рассмотрим методику формирования ГИС-проекта, направленного на определение оценок и ранжирование инженерных сооружений (ИС) по степени опасности и поддержки принятия решений.

ГИС-проект ранжирования ИС по степени опасности (РИС СО) должен реализовать логику, показанную в виде блок-схемы на рис. 2

Рассмотрим содержание отдельных этапов решения задач управления развивающимися территориями с обеспечением заданных экологических стандартов.

1. Формирование географической основы для решения поставленной задачи.

В ГИС-проекте ранжирования ИС по степени опасности (РИС СО) указывается объект анализа: район, его принадлежность, структура ИС СЗТП, проектные характеристики целевого применения территории и расчетные характеристики всех ИС СЗТП. На основании этих данных формируется географическая основа района, производится географическое и административное районирование ТС, база геоданных описания ИС СЗТП на основании разработанной модели, в которой определяются контролируе-

мые ИС (в рассматриваемом примере это список контролируемых створов мелиоративного канала или системы каналов).

2. Реализация ГИС-проекта «ГИСП НОС ИС и ранжирования ИС по результатам анализа» и использование в качестве базы его результатов.

На основании задания для обследования (список створов) проводятся обследования с целью получения реальных оценок состояния ИС $Cm-к=\{X_m, X_c, E_m, E_c\}$, которые являются базой для реализации ГИС-проекта «ГИСП НОС ИС и ранжирования ИС по результатам анализа». Результатом ГИС-проекта является таблица $Cm^* = \uparrow_{\rho} (Cm = \{Cm-к = \{X_m, X_c, E_m, E_c, O_m^*, \lambda_1^*\}\})$, в которой все створы (ИС) упорядочены по степени опасности своего состояния (соответствия своим расчетным характеристикам).

3. Определение для каждого опасного створа территории зоны подтопления и районирование территории подтопления по степеням опасности от подтопления.

Для каждого опасного створа, имеющего повреждение, на основе ГИС определяется территория подтопления, которая может включать несколько непересекающихся территориальных подсистем разного назначения (разной степени урбанизации) – $G_{\text{ст}l}^* = \{g_{1l}, g_{2l}, ..., g_{kl}, ..., g_{Kl}\}$, площадь которой равна сумме площадей этих территориальных подсистем $S_{cml} = \sum_K S_{gkl}$.

Проведенное районирование является основой для определения оценок риска территорий от подтопления R_{cl} и оценки возможного нанесенного ущерба $У_{cl}$.

4. Получение для каждого опасного створа оценок опасности подтопления, уязвимости подтопления и риска от подтопления для соответствующих территорий.

Для каждой территориальной подсистемы g_{kl} может быть получена оценка риска подтопления $r_{ckl} = \upsilon_{ykl} I_{okl}$, где I_{okl} – коэффициент опасности подтопления, υ_{ykl} – коэффициент уязвимости подтопления. Оценка риска подтопления территорий $G_{\text{ст}l}^*$, связанных с контролируемым створом l, в этом случае вычисляется по формуле

$$R_{\text{cl}} = \sum_{k=1}^{K} \upsilon_{ykl} I_{okl} \frac{S_{kl}}{S_{ol}},$$

где S_{ol} – площадь территории, для которой определяется коэффициент R_{cl}, $S_{ol} = \sum_{k=1}^{K} S_{kl}$, K – число разбиений территории $G_{\text{ст}l}^*$ площадью S_{ol} на непересекающиеся территории g_{kl} площадью S_{kl}, для которых получены оценки коэффициента опасности подтопления I_{okl} и коэффициента уязвимости подтопления υ_{ykl}.

Полученные оценки являются характеристиками анализируемых створов. Они формируются в виде геоинформационных слоев ГИС-проекта и отображаются в базе геоданных, также заносятся в соответствующие графы таблицы атрибутивных данных ИС.

5. Ранжирование створов по степени риска подтопления подпадающих под их воздействие территорий.

Задача нахождения наиболее опасных повреждений инженерных сооружений, приводящих к максимальному риску от подтопления, может быть решена в ГИС следующим образом. Для упрощения анализа в ГИС-проекте реализуется процедура упорядочивания, в результате которой формируется таблица, удобная для анализа и принятия управляющих решений $\downarrow Ст(O_R) = \{Ст_{\lambda R\max}, ..., Ст_{\lambda R\min}\}$.

6. Оценка объема работ (затрат), необходимых для восстановления проектных характеристик канала и эффективности их проведения.

Оценка объемов работ по восстановлению канала определяется специалистами-экспертами в процессе обследований ИС СЗТП. Оценка может исчисляться в относительных (относительно первоначальной стоимости анализируемого инженерного сооружения или его части) или абсолютных единицах (стоимость работ). Однако для проведения анализа относительную оценку необходимо привести к абсолютной оценке C_{al}. Так как абсолютная оценка объемов работ по восстановлению позволяет оценить эффективность принимаемых решений, $\lambda_{Ycla} = f(O_1, У_{ПСml}, C_{al}, p_{ol}, p_{Уl}, p_{Cl})$.

7. Оценка объемов возможного нанесенного ущерба в случае подтопления территории из-за нарушения функционирования канала.

Оценка объемов возможного нанесенного ущерба, так же как и оценка объемов работ по восстановлению канала, определяется специалистами-экспертами в процессе обследований ИС СЗТП. Оценка объемов возможного нанесенного ущерба измеряется в абсолютных единицах объема ущерба $У_{\text{ПСт}l}$. Эта оценка также позволяет оценить эффективность принимаемых решений $\lambda_{Ycla} = f(O_1, У_{ПСml}, C_{al}, p_{ol}, p_{Уl}, p_{Cl})$.

8. Ранжирование сооружений по степени опасности (возможному нанесенному ущербу от затопления территорий).

Так же как и в п. 5, задача нахождения наиболее опасных инженерных сооружений, приводящих к максимальному возможному нанесенно-

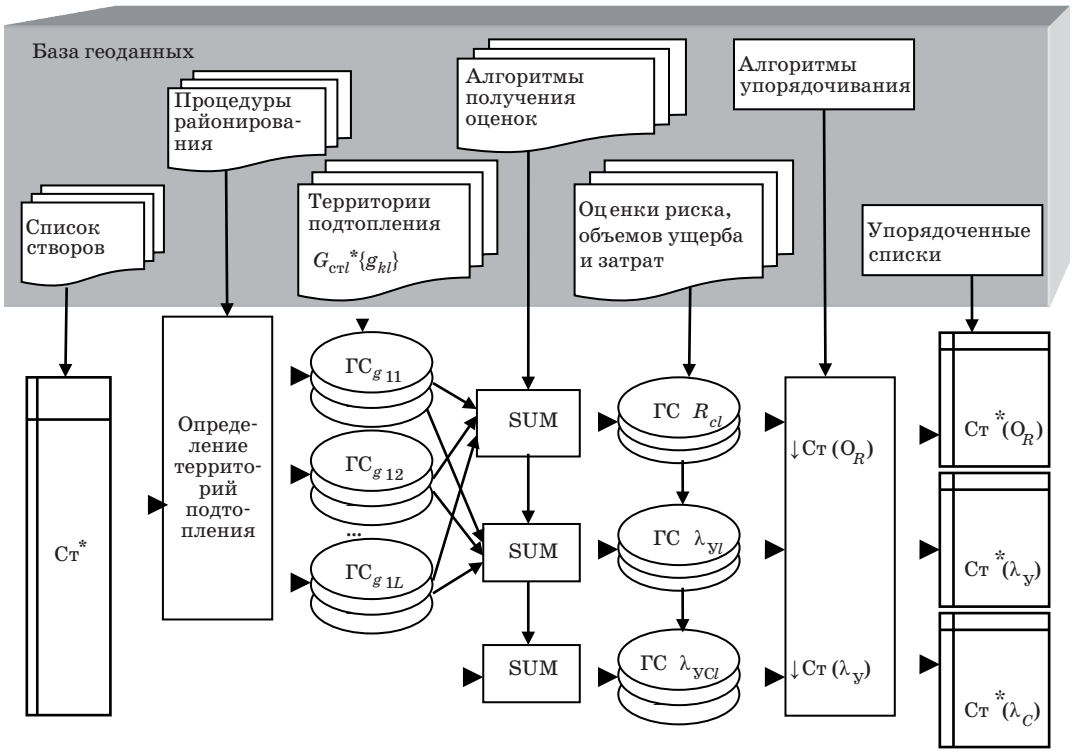


Рис. 3. Структура «ГИСП НО состояния ИС и ранжирования ИС по результатам анализа»

му ущербу от подтопления, может быть решена в ГИС путем выполнения процедуры упорядочивания, в результате которой формируется таблица, удобная для анализа и принятия управляющих решений $\downarrow Ст(\lambda_у)=\{Ст_{у\max}, ..., Ст_{у\min}\}$.

9. Решение задачи наиболее эффективного вложения средств на ремонт и реконструкцию инженерных сооружений.

Задачи наиболее эффективного вложения средств на ремонт и реконструкцию инженерных сооружений может быть решена на основе сформированной оценки эффективности восстановления опасного створа, определяемой отношением $У_{ПСml}/C_{al} - \lambda_{УClo} = f(O_1, У_{ПСml}, C_{al}, p_{ol}, p_{уl}, p_{Cl})$, или абсолютными значениями показателей ущерба и затрат $У_{ПСml}, C_{al} - \lambda_{УClo} = f(O_1, У_{ПСml}, C_{al}, p_{ol}, p_{уl}, p_{Cl})$. При этом вариант наиболее эффективного вложения также может быть решен в ГИС путем выполнения процедуры упорядочивания, в результате которой формируется таблица, удобная для анализа и принятия управляющих решений $\downarrow Ст(\lambda_{УCl})=\{Ст_{УC\max}, ..., Ст_{УC\min}\}$.

Данная информация является определяющей для принятия решений по ремонту или восстановлению технических сооружений, представляющих наибольшую опасность и приводящих к наибольшему ущербу в случае подтопления территории.

10. Предоставление результатов анализа в ранжированном виде.

Используя стандартные в ГИС средства, все полученные результаты могут быть представлены специалисту для принятия решений в удобном виде: таблицы, графики, гистограммы, тематические карты.

Структура ГИС-проекта показана на рис. 3.

Таким образом, разработанное алгоритмическое обеспечение мониторинга состояния территорий и ИС СИЗТП на базе геоинформационных технологий представляется эффективным инструментом для решения задач управления развивающимися территориями. Представление территориальной системы в виде подсистем, характеристики которых организованы в виде слоев ГИС, создает базу для формирования ГИС-проектов, обеспечивающих автоматическое определение оценок состояния контролируемых объектов и анализ оценки степени риска от подтопления территорий.

Проведенное геоинформационное районирование позволяет определить степень воздействия системы водосбора каждой территории на ее природную систему и хозяйственную инфраструктуру, степень воздействия на прилегающие территории и их системы инженерной защиты от подтопления. Выбранные оценки степени риска от подтопления для каждой терри-

тории позволяют оценить степень важности (экономической опасности) той или иной территории и обосновывают необходимость поддержания высокого (расчетного) уровня работоспособности инженерных сооружений защиты территории от подтопления. Ранжирование инженерных сооружений по степени опасности и решение задачи наиболее эффективного вложения средств на ремонт и реконструкцию инженерных сооружений обеспечивают поддержку принятия управляющих решений при планировании экономического развития территорий.

Библиографический список

1. Водная стратегия РФ на период до 2020 г. Распоряжение Правительства РФ; 27.08.2009 №1235-р.
2. *Федоров, М. П.* Экологические основы управления природно-техническими системами. СПб.: Изд-во Политехнич. ун-та, 2007.
3. *Арефьева, Е. В.* Подтопление как потенциальный источник ЧС. Технологии гражданской безопасности / Е. В. Арефьева, В. И. Мухин, Э. Г. Мирмович. 2007. № 4 (14).
4. *Дружинин, Н. И.* Математическое моделирование и прогнозирование загрязнения вод суши / Н. И. Дружинин, А. И. Шишкин. Л.: Гидрометеоиздат; 1989.
5. *Алексеев, В. В.* Информационные измерительные системы. Комплексная оценка состояния объектов окружностей природной среды на основе ГИС-технологий / Вестн. образования и развития науки Российской академии естественных наук. 2001. № 5 (3). С. 230–240.
6. *Шишкин, А. И.* Управление качеством окружающей среды с применением геоинформационных систем. СПб.: Изд-во Политехнич. ун-та, 2011.
7. *Шишкин, А. И.* Геоинформационная моделирующая система нормирования допустимых сбросов для целлюлозно-бумажных комплексов / А. И. Шишкин, А. В. Епифанов, И. В. Антонов // Сб. матер. XII Междунар. экологич. форума «День Балтийского моря». СПб: ООО «Цветпринт», 2011. С. 31–32.
8. *Кондратьев, С. А.* Водные объекты Санкт-Петербурга / С. А. Кондратьев, Г. Т. Фрумин. СПб.: Символ, 2002.
9. *Исаев, Л. К.* Контроль химических и биологических параметров окружающей среды. СПб.: Эколого-аналитический информационный центр «Союз», 1998.
10. *Шитиков, В. К.* Количественная гидроэкология: методы системной идентификации / В. К. Шитиков, Г. С. Розенберг, Т. Д. Зинченко. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003.
11. *Шишкин, А. И.* Интегрированное нормирование допустимых сбросов для водопользователей бассейна Балтийского моря / А. И. Шишкин, А. В. Епифанов, И. В. Антонов / Сб. матер. XI Междунар. экологич. форума «День Балтийского моря». СПб.: ООО «Макси-Принт», 2010. С. 206–207.
12. Св-во гос. рег. прогр. для ЭВМ 2009615259, Российская Федерация. REG_SOST / А. И. Шишкин, А. В. Епифанов, И. В. Антонов, В. В. Алексеев, Н. И. Куракина, Е. В. Желтов. правообладатель Санкт-Петербургский гос. электротехн. ун-т. № 2009615259; дата поступл. 07.08.2009; дата регистр. 23.09.2009.
13. *Жуков, К. Г.* Модельное проектирование встраиваемых систем в LabVIEW. М.: ДМК Пресс, 2011.
14. *Жильникова, Н. А.* Информационно-измерительная система мониторинга защиты территории топливно-энергетического комплекса от подтопления на основе геоинформационной технологии / Н. А. Жильникова, В. В. Алексеев, И. А. Шишкин // Информационно-управляющие системы. 2015. № (6). С. 93–95.
15. Методика оценки риска чрезвычайных ситуаций и нормативы приемлемого риска чрезвычайных ситуаций. Проблемы анализа риска. 2007. № 4 (4).
16. *Жильникова, Н. А.* Информационно-измерительная система мониторинга защиты территории топливно-энергетического комплекса от подтопления на основе геоинформационной технологии / Н. А. Жильникова, В. В. Алексеев, И. А. Шишкин // Информационно-управляющие системы. 2015. № (6). С. 93–97.

УДК 535.36:535.346.1

Е. Н. Киприянова*
кандидат технических наук, доцент
В. О. Смирнова*
кандидат технических наук
А. С. Смирнова*
старший преподаватель
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ОРГАНИЗАЦИЯ СЕТИ ПОСТОВ КОНТРОЛЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ГОРОДОВ

В статье рассмотрен метод определения местоположения постов экологического мониторинга для контроля атмосферного воздуха городов, позволяющий повысить точность получаемой информации о концентрации загрязняющих веществ в атмосфере.

***Ключевые слова**: загрязняющие вещества, сеть постов экологического мониторинга, зона активного загрязнения.*

E. N. Kipriyanova*
PhD. Tech., Associate Professor
V. O. Smirnova*
PhD. Tech.
A. S. Smirnov*
Senior Lecturer
**Saint-Petersburg state University of aerospace instrumentation*

THE ORGANIZATION OF A NETWORK OF STATIONS MONITORING ATMOSPHERIC AIR OF THE CITIES

The article deals with the method of determining the location of environmental monitoring posts for urban air control, which allows to improve the accuracy of the information obtained about the concentration of pollutants in the atmosphere.

***Keywords:** contaminants, a network of posts of ecological monitoring, is an area of active pollution.*

В урбанизированной среде, сильно загруженной техногенными выбросами, особенно важным становится получение достоверной информации об уровне загрязнения атмосферного воздуха, поскольку с этим связана деградация зеленых насаждений и риск заболевания людей.

В настоящее время отсутствует универсальный способ выбора мест расположения постов мониторинга атмосферного воздуха в городах. Это связано с тем, что процесс рассеивания загрязняющих веществ зависит от многих факторов, таких как: преобладающие направления и скорость ветров, частота инверсий и их характер, частота штилей, туманов, характеристика источников выброса и параметров выхода газовых смесей из устья источников, состава загрязняющих веществ и прочих факторов [1–5]. Кроме этого, значительную роль играют фоновые концентрации примесей, характерные для различных районов мегаполисов.

Отбор проб воздуха проводят по оси факела выброса (ось X на рис. 1), как правило, на расстоянии $X_{макс}$ 10–40 средних высот труб, где особенно велика вероятность проявления максимальных приземных концентраций примесей.

Согласно [6] посты располагают в жилых районах (в первую очередь, в наиболее загрязненных) с различным типом застройки, зонах отдыха, автомагистралях. При этом обязательно определяется содержание взвешенных веществ, диоксидов азота и серы, оксида углерода

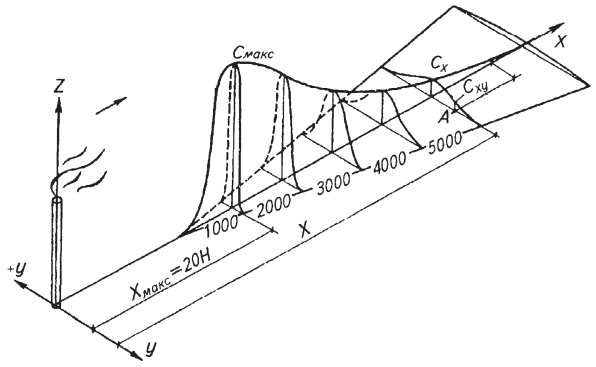


Рис. 1. Схема изменения приземной концентрации примесей по оси факела выброса

в атмосферном воздухе. В зависимости от численности населения лимитируется только минимальное количество постов: от 1 (до 50 тыс. жителей), 5–10 (более 500 тыс. жителей) и 20 постов в городах с населением более 1 млн жителей.

Правила выбора места отбора представительной пробы четко установлены только для газоходов, на выходе выброса из источника [7].

Таким образом, общий характер рекомендаций и отсутствие универсальных правил выбора наилучшего места отбора представительных проб воздуха на территории города объясняют многообразие предлагаемых в патентах оригинальных решений (см. таблицу). Все они предусматривают тщательное изучение плана территории города или промышленной зоны, метеоусловий и атмосферного фона, характеристик источников выбросов и построение карты полей максимальных приземных концентраций. Выбор местоположения поста отбора основывается на сравнении максимальных концентраций вещества с предельно допустимыми значениями (ПДК).

Вместе с тем в рассмотренных в таблице решениях следует отметить недостаточный учет и конкретизацию важных факторов:

– контроль примесей, как правило, ограничивается только перечнем приоритетных веществ и источников с учетом суммации действия определенных совместно присутствующих загрязняющих веществ, а также учитываются только основные метеопараметры;

– недостаточный учет местных особенностей рельефа, характера застройки и ландшафтного озеленения, влияющих на рассеивание примесей при конкретном расположении источников на независимых промышленных площадках;

– неучет взаимного перекрывания полей концентраций от групп источников в границах одной промышленной площадки;

– отсутствие количественной оценки вероятности выхода полей максимальных концентраций за пределы площадки объекта и эмиссии примесей в жилые кварталы, прилегающие к промышленной зоне.

Для организации эффективного контроля качества воздуха целесообразно выявлять пространство устойчивого долгосрочного аэротехногенного загрязнения – зону активного загрязнения (ЗАЗ) как территорию, в пределах которой в результате рассеяния загрязняющих веществ, поступающих от организованных и неорганизованных источников выбросов, выпадает вся их масса, причиняющая ущерб. Ее максимальный размер не более 40 высот самого высокого источника при скорости ветра 0,5 м/с. Необходимость координации мест компактного проживания населения и ЗАЗ указанного размера для предприятий I–III классов опасности при оптимизации сети мониторинга по европейским нормам отмечают и авторы работы [11].

Площади ЗАЗ и возможности их взаимного перекрывания определяются вариантами расположения источников: равномерно или неравномерно рассредоточены по территории, близко или далеко отстоят друг от друга, одиночные или групповые и т. п. Наименьшее неблагоприятное воздействие создают удаленные друг от друга источники. Чрезвычайно важно исследовать взаимное влияние при наложении и смешении выбросов многих источников с одноименным составом примесей.

Группы источников, работая одновременно, взаимно усиливают негативное воздействие и расширяют его совокупную зону. Мощные источники, сконцентрированные на малых площадях, создают резкие скачки уровня загрязнения воздушной среды даже при незначительных отклонениях от усредненных параметров (мощность и скорость выброса, скорость ветра и др.). Неблагоприятные и аномальные метеоусловия (штили и слабые ветры, высокие температуры, приземные инверсии) приводят к «задымлению» территории, увеличивая число жалоб населения и обращений в медицинские учреждения.

Решение задачи выбора лучшего места для натурных измерений должно быть основано на поиске участков максимально возможного загрязнения атмосферного воздуха, а критерием может служить величина соотношения площадей ЗАЗ и промплощадки.

Итак, если соотношение величин расчетной среднегодовой площади ЗАЗ от какого-либо конкретного источника и площади промплощадки превышает единицу и при этом ЗАЗ выходит

Таблица

Способы определения местоположения поста мониторинга загрязнения атмосферного воздуха (обзор патентов)

Год и номер патента	Наименование и патентообладатель	Способ определения местоположения постов контроля атмосферного воздуха
2000 г. № 2161321 G01W1/00	Способ контроля за выбросами загрязняющих веществ источни-ками загрязнения атмосферы ГРЦ «КБ им. акад. В. П. Макеева»	Выбор местоположения поста по взаимосвязи массового выброса и концентрации вещества в пункте контроля при текущих метеоусловиях. Учитывают источники, суммарный вклад которых не менее 80% от расчетного загрязнения. При превышении максимально санкционированного уровня на 10% и более, осуществляют экстренные замеры
2010 г. № 2385473 G01N33/00	Способ экологического мониторинга химически опасных объектов Ижевский государственный технический университет	Три поста контроля устанавливают треугольником, а с подветренной стороны от центра треугольника устанавливают подфакельный пост, который перемещают на основании данных, поступающих с метеодатчиков, по внутреннему (внешнему) условному контуру треугольника в сторону изменившегося направления ветра
2010 г. № 2397514, G01W1/02	Способ построения сети постов мониторинга загрязнения атмосферы и определения характеристик источников ее загрязнения ФГУН ГНЦ ВБ «Вектор»	Создают трехмерную координатную сетку территории. Для каждого источника определяют теоретически возможные сочетания троек постов контроля, ранжируют тройки постов по числу повторений для всех метеоусловий и принимают решение об оптимальной расстановке постов, если теоретические данные отличаются от измеренных значений на величину, не превосходящую заранее заданную
2013 г. № 2498359 C1	Способ контроля загрязнения атмосферного воздуха В. И. Сафарова и Л. Я. Исачкина	Создают сеть автоматизированных станций контроля, места размещения которых определяют по анализу расчетов рассеивания загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы с использованием унифицированной программы. Источник выбирают по наличию в воздухе специфических индикаторных соединений («отпечатки предприятий»)
2014 г. № 2522719 C2	Способ определения зоны влияния продуктов токсичных выбросов свалок Российский государственный метеорологический университет	Зона влияния выбросов свалок с учетом метеорологических условий оценивается по разным пространственным направлениям в радиусе 30 км от центра свалки по данным стандартных метеорологических наблюдений через каждые 6 часов. Цель – оценка атмосферного времени жизни продуктов токсичных выбросов в регионе в конкретный сезон
2014 г. № 2536789 C1	Система экологического мониторинга атмосферного воздуха горнопромышленной промагломерации Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»	Система содержит первую и вторую группы быстродействующих датчиков экологического контроля состояния атмосферы, систему GPS, метеостанцию, мобильную телефонную станцию, центральный диспетчерский пункт. Датчики первой группы для измерения фоновых концентраций химического загрязнения и уровней физического загрязнения атмосферного воздуха устанавливают на стационарных постах, второй группы – на беспилотных летательных аппаратах, совершающих облеты территории по заданной программе

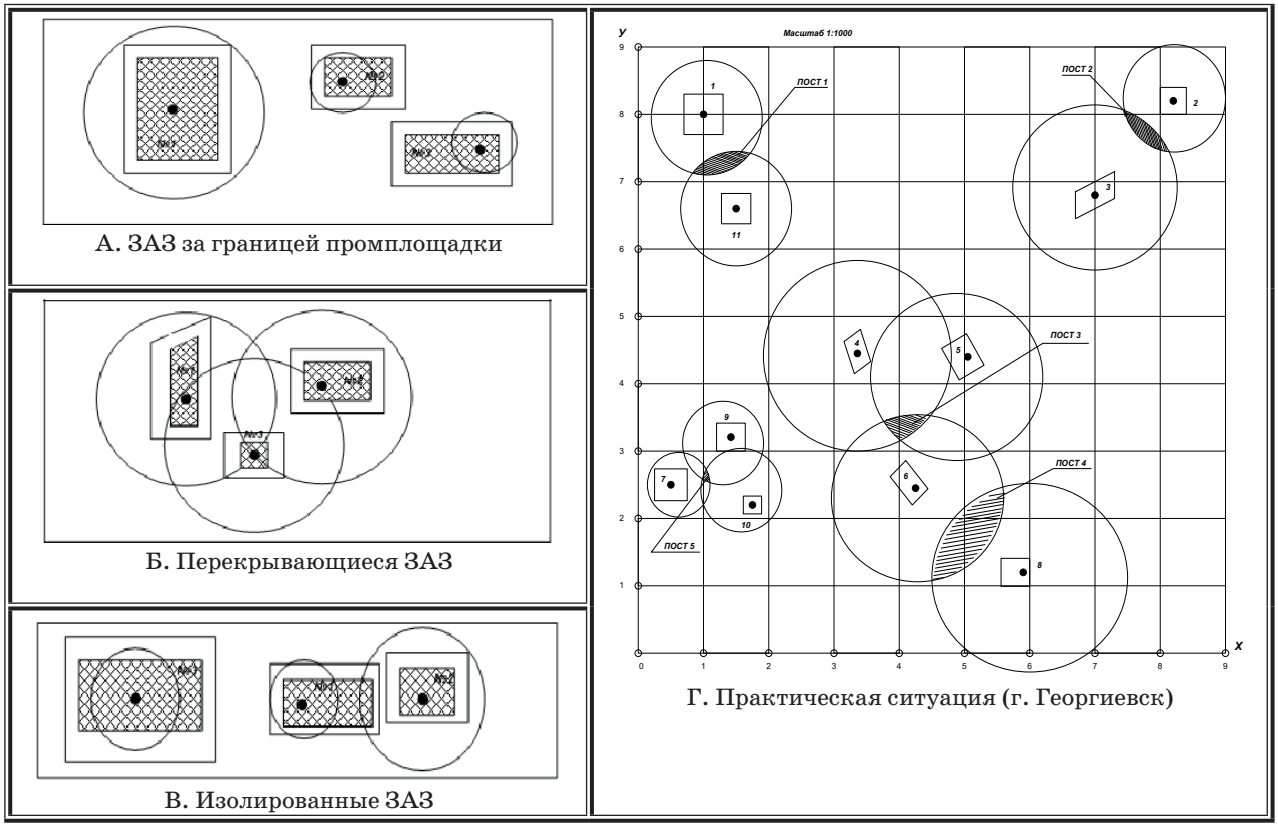
за пределы санитарно-защитной зоны в зону жилой застройки, то надзорный орган получает сигнал о потенциальном риске загазованности воздуха в жилых кварталах. Если на ситуационную карту промузла (микрорайона, города в целом) нанести конфигурации промплощадок и ЗАЗ от приоритетных комбинаций «источник – вещество», то можно обозначить варианты сверхнормативного загрязнения (рис. 2):

– размер ЗАЗ источника больше размера промплощадки, область риска сверхнормативного загрязнения воздуха находится за границей предприятия (рис. 1, *А*);

– источники расположены на разных площадках, зоны взаимно перекрываются, область наибольшего риска находится в месте наложения ЗАЗ (рис. 1, *Б*);

– ЗАЗ от источника предприятия «попадает» на территорию соседнего объекта (возникает конфликт интересов), мониторинг проводится по согласованию (рис. 1, *В*).

Исследования, выполненные для 33 предприятий и 176 источников выброса загрязняющих веществ, в том числе пыли (зерновая, мучная, меховая, абразивная, древесная), диоксида азота, бензина, перхлорэтилена, формальдегида



Условные обозначения: № – номер объекта, □ – источник выброса, — – граница СЗЗ, О – площадь ЗАЗ, ▨ – промплощадки

Рис. 2. Варианты перекрывания ЗАЗ и размещения постов мониторинга

и уксусного альдегида, позволили рекомендовать следующий способ формирования сети постов экологического мониторинга атмосферного воздуха.

Отличительным моментом способа формирования сети экомониторинга является оценка уровня застройки и озеленения территории, расчет среднегодовых величин ЗАЗ с учетом вероятностного характера решающих погодных факторов (штиль и осадки). По результатам расчета и сравнительного анализа полей концентраций примесей выявлено пять участков максимального перекрывания ЗАЗ за пределами промплощадок, которые рассматриваются как лучшие точки для отбора проб воздуха (рис. 2, *Г*).

Таким образом, атмосфера урбанизированной территории – это единое целое, и любая примесь, поступающая в атмосферу, в той или иной концентрации обнаруживается в любой части города. Выполненные исследования могут быть использованы при формировании пространственной структуры размещения постов экологического мониторинга для контроля концентраций вредных веществ в воздухе.

Области максимальных концентраций примесей в городской атмосфере соответствуют участкам взаимного наложения зон активного загрязнения, формируемых источниками на границе с жилой, рекреационной и иными территориями, где и должны размещаться посты мониторинга. Это позволит обеспечить точность получаемой информации о концентрации загрязняющих веществ в атмосфере путем повышения надежности определения местоположения постов экологического мониторинга атмосферного воздуха городов, а также исключить из объектов мониторинга источники, вносящие незначительный вклад в общее загрязнение воздушной среды города, минимизировать число постов и, соответственно, сократить объем необходимых затрат.

Библиографический список

1. Оптимизация региональной системы мониторинга атмосферного воздуха на примере г. Нижнекамска / Е. И. Игонин, А. П. Шлычков, А. Р. Ша-

гидуллин, Р. Р. Шагидуллин // Российский журнал прикладной экологии. 2016. № 3. С. 33–39.
2. Распоряжение Правительства РФ от 03.09.2010 г. № 1458-р «Стратегия деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях на период до 2030 г. (с учетом аспектов изменения климата). Гидрометцентр России. М., 2010.
3. Environment Canada–Air. About the Air Quality Health Index. Ec.gc.ca. 2013-07-16. Retrieved 2013-07-23.
4. Industrial Air Pollution and Its Effects on Human's Respiratory System (A Sociological Studyof Bhoun shugar Mill District Jhang, Pakistan) / N. Gull, Dr. Y. Nawaz, M. Ali, Dr. N. Hussain, R. Nawaz, S. K. Mushtaq //Academic Journal of Interdisciplinary Studies MCSER Publishing, Rome-Italy. 2013. Vol. 2. No 3, November. P. 535–545.
5. *Уланова, Т. С.* Оценка экологической ситуации в зоне влияния крупного промышленного узла / Т. С. Уланова, Т. Д. Карнажицкая, Т. В. Нурисламова // Вестн. ПНИПУ. Урбанистика. 2012. № 1. С. 124–130.
6. Письмо Роспотребнадзора от 02.10.2006 г. № 0100/10460-06-32 «Об организации лабораторного контроля при проведении социально-гигиенического мониторинга».
7. ГОСТ Р ИСО 10396-2006. Выбросы стационарных источников. Отбор проб при автоматическом определении содержания газов.
8. Определение зон активного загрязнения атмосферного воздуха от промышленных предприятий и транспорта для организации систем экологического мониторинга урбанизированных территорий / В. С. Бахарев, А. В. Маренич, П. Н. Саньков, В. В. Гилев // Наука, техника и образование. 2016. № 12 (3). С. 33–37.

УДК 519.24, 519.254

Ю. А. Пичугин*
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
В. Б. Разумовский*
магистрант
**Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения*

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ ДАННЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ МНОГОМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

Анализируются ежесуточные данные концентрации химических соединений NO и NO_2 в атмосфере районов Санкт-Петербурга за февраль и март 2018 года. Районирование осуществляется на основе модели главных компонент (ГК) определением статистически однородных зон. На основе модели регрессии на ГК и количества информации по Шеннону оценивается информативный вклад отдельных районов и однородных зон в общую экологическую ситуацию.

***Ключевые слова**: данные концентрации химических соединений, метод главных компонент, информативность по Шеннону.*

Yu. A. Pichugin*
PhD. Phys.-Math., Senior Research Employee
V. B. Razumovsky*
Postgraduate Student
**Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation*

ECOLOGICAL ZONING AND EVALUATION OF INFORMATIVE DATA FOR ENVIRONMENTAL MONITORING BASED ON MULTIVARIATE MODELS OF MATHEMATICAL STATISTICS

Daily concentration data of chemical compounds NO and NO2 in the atmosphere of St. Petersburg districts for February and March of the current year are analyzed. Zoning is carried out on the basis of the principal component (PS) model by defining statistically homogeneous zones. Based on the PC regression model and the amount of Shannon information, the informative contribution of individual districts and homogeneous zones to the overall environmental situation is evaluated.

***Keywords:** data concentration of chemical compounds, the method of principal components, Shannon information content.*

Введение

Исходные данные экологического мониторинга, как правило, имеют многомерный характер, что обусловлено прежде всего необходимостью контроля обширных территорий, покрытых сетью пунктов экологического наблюдения. В анализе экологической ситуации такое обилие информации приводит к необходимости решения следующих задач: определение относительно однородных зон и выявление наиболее информативных пунктов наблюдения за экологической обстановкой в целом.

Целью решения задач такого рода следует считать не сокращение сети пунктов экологического наблюдения, а лишь увеличение скорости реагирования на опасные экологические ситуации.

Начнем с рассмотрения первой из ранее упомянутых задач.

1. Статистическое районирование на основе главных компонент

Данные за некоторый срок наблюдения мы будем представлять в виде вектора **y** размерно-

сти m (dim$\mathbf{y}=m$). В нашем случае m – это количество пунктов экологического наблюдения. Предположим, имеется выборка наблюдений объема n, т. е. $\{\mathbf{y}_j, j=1, 2, ..., n\}$, j – некоторый временной отсчет. Тогда, предполагая, что вектор $\mathbf{y}$ принадлежит многомерному нормальному распределению $\mathbf{y} \sim N(\theta_\mathbf{y}, \mathbf{V}_\mathbf{y})$, вычислим несмещенные оценки параметров

$$\hat{\theta}_\mathbf{y} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\mathbf{y}_j, \quad \hat{\mathbf{V}}_\mathbf{y} = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(\mathbf{y}_j - \hat{\theta}_\mathbf{y})(\mathbf{y}_j - \hat{\theta}_\mathbf{y})^T,$$

где T – знак транспонирования. Вычислим такую ортогональную матрицу $\mathbf{P}$, что выполняется равенство

$$\mathbf{P}^T\hat{\mathbf{V}}_\mathbf{y}\mathbf{P} = \ddot{\mathbf{E}} = \mathrm{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_m)$$

и

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \ldots \geq \lambda_m.$$

$$\left(\sum_{i=1}^{k}\lambda_i \Big/ \sum_{i=1}^{m}\lambda_i\right)100\% = \gamma 100\% \geq K\%,$$

где K – заранее установленный минимальный процент общей дисперсии. Рассмотрим матрицу $\mathbf{P}_{(k)}$, которая содержит только первые k столбцов $\mathbf{P}$. Тогда строки матрицы $\mathbf{P}_{(k)}$ с одинаковой сигнатурой соответствуют пунктам, принадлежащим одной статистически однородной зоне (см. [1, 2]).

Отметим, что выборочными главными компонентами называются компоненты вектора $\mathbf{P}^T(\mathbf{y} - \hat{\theta}_\mathbf{y})$. Мы же рассматриваем лишь первые k главных компонент, которые образуют вектор $\mathbf{P}_{(k)}^T(\mathbf{y} - \hat{\theta}_\mathbf{y})$, относительная доля дисперсии которых равна γ.

На рис. 1 и 2 представлены результаты районирования Санкт-Петербурга по данным концентрации химических соединений NO и NO_2 в атмосфере. Данные были собраны по 18 районам Санкт-Петербурга ($m=18$) за февраль и март. Таким образом, объем выборки данных NO составил $n=58$ (один пропуск данных) и $n=59$ – объем выборки данных NO_2. При $k=3$ по данным NO относительная доля дисперсии равна $\gamma 100\% = 86\%$, а по данным NO_2 – $\gamma 100\% = 77\%$, что также достаточно для общей картины.

Так как первый вектор матрицы $\mathbf{P}_{(k)}$ в обоих случаях не имел перемен знака, то в результате мы имеем по каждому химическому соединению 4 (2^2) статистически однородные зоны, которые представлены на рис. 1 и 2.

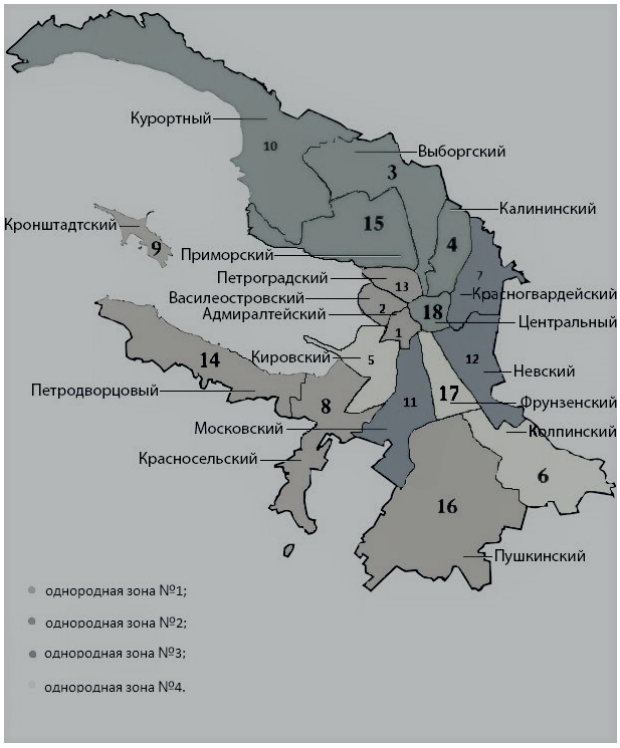


Рис. 1. Статистически однородные зоны по данным NO

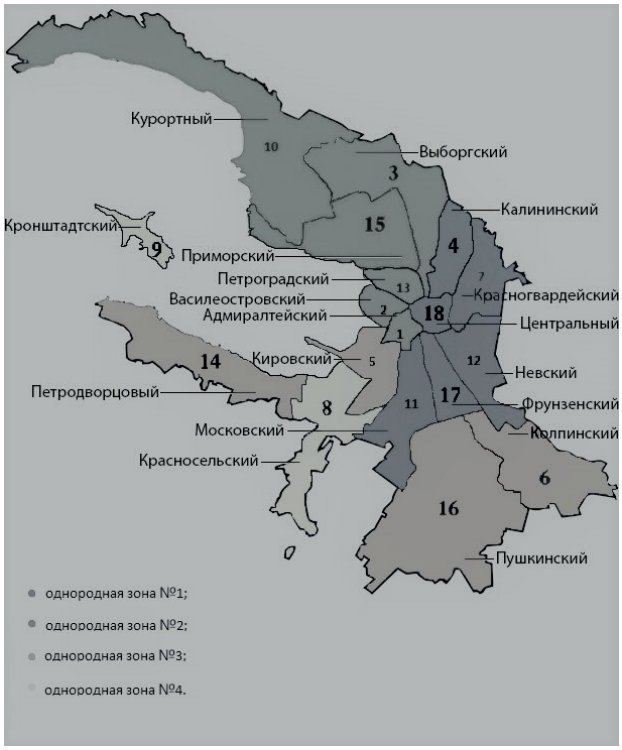


Рис. 2. Статистически однородные зоны по данным NO_2

2. Оценка информативности отдельных пунктов (районов Санкт-Петербурга) и статистически однородных зон

Рассмотрим следующую регрессионную модель $\mathbf{y}-\hat{\theta}_{\mathbf{y}}=\mathbf{P}_{(k)}\mathbf{z}+\boldsymbol{\varepsilon}$, предполагая, что вектор остатков ε имеет многомерное нормальное распределение с независимыми компонентами и одинаковой дисперсией σ^2.

Для уменьшения количества индексов будем использовать следующие обозначения $\mathbf{y}:=\mathbf{y}-\hat{\theta}_{\mathbf{y}}$ и $\mathbf{F}:=\mathbf{P}_{(k)}$, тогда наша регрессионная модель примет вид $\mathbf{y}=\mathbf{F}\mathbf{z}+\varepsilon$. Компоненты $\mathbf{z}$ (главные компоненты) можно интерпретировать как некоторые скрытые факторы. Количество информации по Шеннону, содержащееся в компонентах $\mathbf{y}$ относительно компонент $\mathbf{z}$, равно (см. [2, 3])

$$I_s(\mathbf{y},\mathbf{z})=\frac{1}{2}\log_a\det(\mathbf{I}+\sigma^{-2}\mathbf{F}^T\mathbf{F}\Lambda),$$

где a – масштаб единиц измерения информации ($a>1$), $\mathbf{I}$ – единичная матрица, $\Lambda=\mathrm{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_k)$, $\sigma^2=(m-k)^{-1}(\mathrm{tr}\,\hat{\mathbf{V}}_{\mathbf{y}}-\mathrm{tr}\Lambda)$. Предположим, что $\mathbf{q}\subseteq\{1, 2, \ldots m\}$, тогда через $\mathbf{y}_{\mathbf{q}}$ будем обозначать вектор размерности $\mathrm{card}\mathbf{q}$, в котором содержатся компоненты $\mathbf{y}$ только с номерами из множества $\mathbf{q}$. В этом случае количество информации по Шеннону, содержащееся в компонентах $\mathbf{y}_{\mathbf{q}}$ относительно компонент $\mathbf{z}$, равно

$$I_s(\mathbf{y}_{\mathbf{q}},\mathbf{z})=\frac{1}{2}\log_a\det(\mathbf{I}+\sigma^{-2}\mathbf{F}_{\mathbf{q}}^T\mathbf{F}_{\mathbf{q}}\Lambda),$$

где $\mathbf{F}_{\mathbf{q}}$ содержит строки только с номерами из множества $\mathbf{q}$. Увеличивая пошагово $\mathrm{card}\mathbf{q}$ от нуля до m и максимизируя на каждом шаге величину $I_s(\mathbf{y}_{\mathbf{q}}, \mathbf{z})$, мы получим последовательность значений информации I_i ($i=1, 2, \ldots m$), а также последовательность значений приращений информации $\Delta I_i=I_i-I_{i-1}$. Эти значения удобно рассматривать в относительных единицах (исключая зависимость от выбора a), то есть $I_i:=(I_i/I_s(\mathbf{y}, \mathbf{z}))100\%$ и $\Delta I_i:=(\Delta I_i/I_s(\mathbf{y}, \mathbf{z}))100\%$.

На рис. 3, 4 представлены графики роста I_i в относительных единицах.

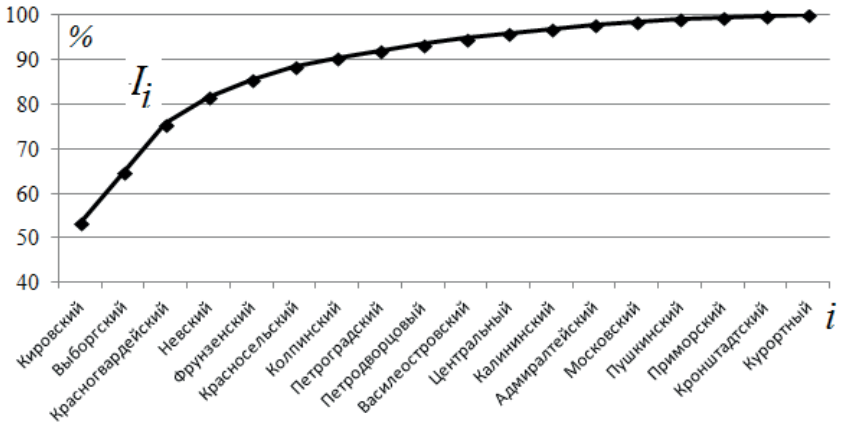


Рис. 3. Результат информативного упорядочивания районов Санкт-Петербурга по данным NO

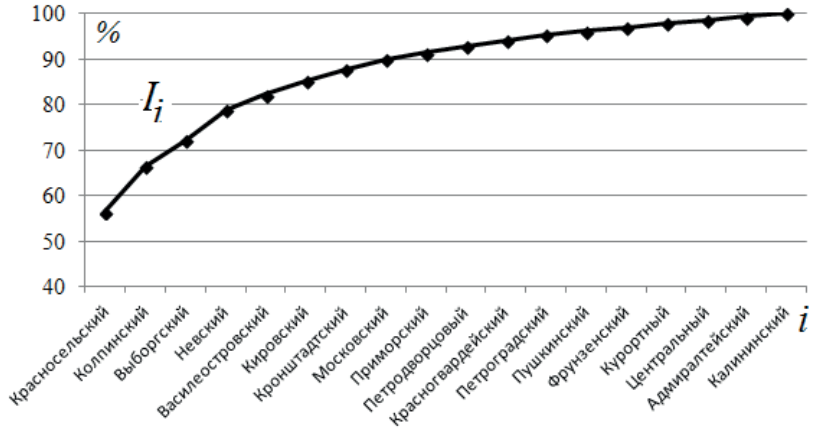


Рис. 4. Результат информативного упорядочивания районов Санкт-Петербурга по данным NO_2

Таблица 1

Информативность статистически однородных зон по данным NO

	Зона 1	ΔI %	Зона 2	ΔI %	Зона 3	ΔI %	Зона 4	ΔI %
Районы	Красносельский	2,9	Выборгский	11,4	Красногвардейский	10,8	Кировский	53,4
	Петроградский	1,7	Центральный	1,1	Невский	6,2	Фрунзенский	3,7
	Петродворцовый	1,4	Калининский	1,0	Московский	0,7	Колпинский	2,0
	Василеостровский	1,3	Приморский	0,5				
	Адмиралтейский	0,9	Курортный	0,1				
	Пушкинский	0,6						
	Кронштадтский	0,4						
	Сумма	**9,2**		**14,1**		**17,7**		**59,1**

Таблица 2

Информативность статистически однородных зон по данным NO_2

	Зона 1	ΔI %	Зона 2	ΔI %	Зона 3	ΔI %	Зона 4	ΔI %
Районы	Невский	6,9	Выборгский	5,6	Колпинский	10,0	Красносельский	56,4
	Московский	2,2	Василеостровский	3,2	Кировский	3,0	Кронштадтский	2,5
	Красногвардейский	1,3	Приморский	1,6	Петродворцовый	1,4		
	Фрунзенский	0,9	Петроградский	1,2	Пушкинский	0,9		
	Центральный	0,8	Курортный	0,8				
	Калининский	0,6	Адмиралтейский	0,7				
	Сумма	**12,7**		**13,1**		**15,3**		**58,9**

В табл. 1 и 2 представлена общая относительная информативность статистически однородных зон, вычисленная суммированием относительных приращений информации. Эти таблицы улучшают чтение карт, представленных на рис. 1 и 2.

Выводы

Несмотря на то, что результаты исследования выглядят достаточно правдоподобно, так, например, в качестве однородной зоны выделено общеизвестное своей особенностью устье Невы (рис. 1, 2), а по данным NO наиболее информативными оказываются промышленные районы, где, вероятнее всего, и находятся главные источники примесей (табл. 1), тем не менее по этим результатам нельзя делать какие-либо окончательные экологические выводы.

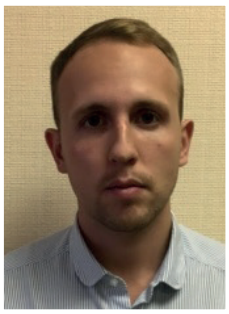
Во-первых, следует учесть, что выборка составила лишь малую часть года, а во-вторых, весенний период характеризуется относительным усилением ветра, что существенно влияет на содержание примесей в атмосфере и затрудняет объективное выявление наиболее информативных пунктов наблюдения. Таким образом, результаты можно рассматривать лишь как проверку предложенной методики исследования на данном материале.

Библиографический список

1. *Пичугин, Ю. А.* Распределение осадков и температуры воздуха в Танзании / Ю. А. Пичугин, Л. Б. Чанга // Известия РГО. 2006. Т. 138. Вып. 4. С. 54–61.
2. *Пичугин, Ю. А.* Экологический мониторинг и методы многомерной математической статистики // Астраханский вестник экологического образования. 2012. № 2. С. 101–105.
3. *Пичугин, Ю. А.* Замечания к отбору данных в задачах, связанных с линейной множественной регрессией // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2002. № 5. С. 61–62.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Алёшкин Никита Андреевич

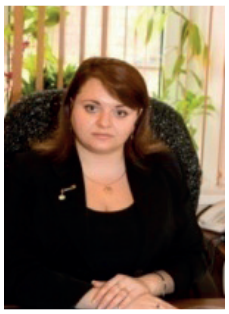


Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, старший преподаватель кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
АО «Научный центр прикладной электродинамики», специалист по организации производственного процесса отдела службы качества и технического контроля.
Область научных интересов – организация производства, производственные процессы, системы управления, управление качеством, экономика предприятия.
nikita.aleshkin@scaegroup.com

Андреев Владимир Михайлович

Кандидат физико-математических наук.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, старший преподаватель кафедры физики.
Область научных интересов – теория оптических интерференционных покрытий.
andreev.vm@gmail.com

Андросенко Наталья Витальевна



Кандидат экономических наук.
ФБУ «Тест-С.-Петербург», заместитель генерального директора.
Область научных интересов – устойчивое развитие предприятий, принятие управленческих решений.
natulina2007@mail.ru

Артюхова Майя Александровна

АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», инженер.
Область научных интересов – надежность, радиационная стойкость, бортовая аппаратура космических аппаратов.
artjuhova_ma@radar-mms.com

Ассаул Виктор Николаевич

Кандидат технических наук.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры прикладной математики.
Область научных интересов – исследование операций, распространение волн.
vicvic21@yandex.ru

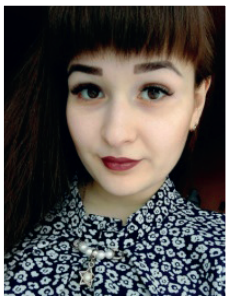
Балашов Егор Владимирович

АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», заместитель главного конструктора.
Область научных интересов – радиолокация.
balashov_ev@radar-mms.com

Балонишников Александр Михайлович

Доктор технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, профессор кафедры высшей математики и механики, профессор кафедры физики.
Область научных интересов – математическое моделирование турбулентности.
balonishnikov@mail.ru

Баранова Анна Андреевна



Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, студент кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – инженерная защита окружающей среды.
anybaranova299751@yandex.ru

Белова Евгения Сергеевна

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, аспирант кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – управление инновациями, экологический менеджмент, стратегии управления.
belova-es@mail.ru

Блудов Александр Александрович

Доктор технических наук, профессор.
АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», главный конструктор.
Область научных интересов – радиолокация.
bludov_aa@radar-mms.com

Сведения об авторах

Богдашева Оксана Александровна

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, студент кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – системы менеджмента качества.
ok.bogdasheva@mail.ru

Бутенина Дина Викторовна

Кандидат физико-математических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры прикладной математики.
Область научных интересов – адаптивное управление вычислительными процессами на случайной конечно-элементной сетке, алгоритмы адаптивной оптимизации квадратурных формул со случайными узлами.
dvbu@mail.ru

Вершинин Михаил Иосифович

Кандидат педагогических наук.
Санкт-Петербургский горный университет, доцент кафедры механики.
Область научных интересов – информационные системы, математическое моделирование.
vershinin_mi@spmi.ru

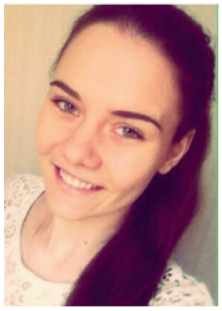
Вершинина Лилия Павловна

Доктор технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, профессор кафедры высшей математики и механики.
Область научных интересов – математическое моделирование, управление в технических системах.
zk-inf@yandex.ru

Ву Ван Диен

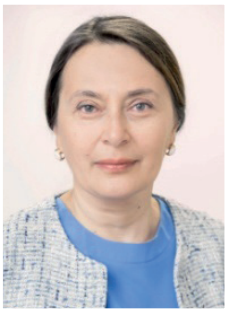
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, аспирант кафедры высшей математики и механики.
Область научных интересов – математика и механика.
vandiennd83@gmail.com

Герасимова Анастасия Александровна



Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, студент кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – цифровая экономика, цифровая трансформация, Индустрия 4.0.
anastasiia.gerasimova1@gmail.com

Гетманова Галина Владимировна

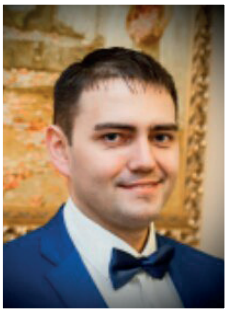


Кандидат экономических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – управленческие инновации, управление человеческими ресурсами.
rechina@mail.ru

Голубков Виктор Александрович

Кандидат технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры прикладной математики.
Область научных интересов – 3D-моделирование объектов сложной конфигурации, контроль и диагностика электромеханических систем.
Viktor-golubkov@yandex.ru

Епифанцев Кирилл Валерьевич



Кандидат технических наук.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности.
Область научных интересов – метрологическое обеспечение технологического оборудования.
metro-guap@yandex.ru.

Жильникова Наталья Александровна

Кандидат технических наук.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – эколого-экономическая оценка безопасности в природно-технических системах, методология внедрения интегрированных систем менеджмента.
nataliazhilnikova@gmail.com

Забавникова Татьяна Алексеевна

Военная академия связи им. С.М. Буденного, преподаватель кафедры математики и инженерной графики.
Область научных интересов – вычислительные методы механики деформируемого твердого тела.
zabavnikova.tatyana.al@yandex.ru

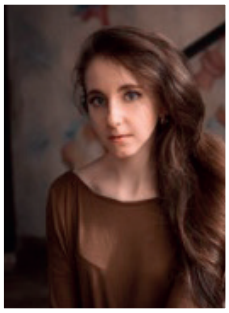
Ивакин Ян Альбертович

Доктор технических наук, профессор.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, профессор кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – оценка качества сложных программных систем, интеллектуальные системы, системы управления.
ivakin@oogis.ru

Иванова Галина Николаевна

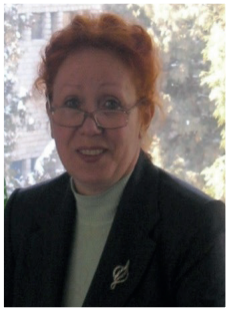
Кандидат экономических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
ФБУ «Тест-С.-Петербург», заместитель генерального директора.
Область научных интересов – устойчивое развитие предприятий, принятие управленческих решений.
ivanova@rustest.spb.ru

Кайдас Любовь Витальевна



Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, студент кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности.
Область научных интересов – метрологическое обеспечение комплексного исследования состояния окружающей среды.
lkaydas@inbox.ru

Киприянова Елена Николаевна



Кандидат технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – экологический мониторинг объектов окружающей среды.
kipr53@ya.ru

Коваленко Иван Иванович

Кандидат физико-математических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, и.о. заведующего кафедрой физики.
Область научных интересов – оптика.
kovallenko@mail.ru

Козенко Сергей Леонидович

Кандидат технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры прикладной математики.
Область научных интересов – информационные технологии.
GUAP42@yandex.ru

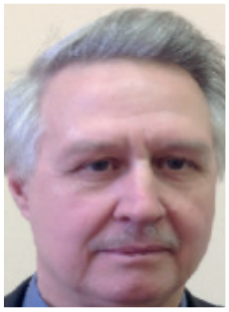
Колобашкина Татьяна Владимировна

Кандидат технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности.
Область научных интересов – техносферная безопасность, физика аэрозолей, методы и средства изучения аэродисперсных систем.
tanya.kolobashkina@mail.ru

Кондратьев Валерий Михайлович

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», студент кафедры микро- и наноэлектроники.
Область научных интересов – твердотельная электроника.
kvm_96@mail.ru

Копыльцов Александр Васильевич



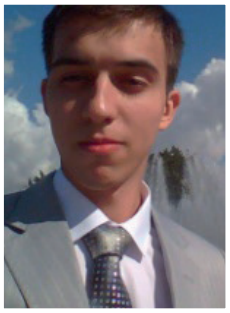
Доктор технических наук, профессор.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, профессор кафедры высшей математики и механики.
Область научных интересов – математическое моделирование.
kopyl2001@mail.ru

Сведения об авторах

Котликов Евгений Николаевич

Доктор физико-математических наук, профессор.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, профессор кафедры физики.
Область научных интересов – оптика и спектроскопия, оптическое приборостроение, физика тонких пленок.
ekotlikov45@mail.ru

Кульбик Владимир Владимирович



Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, студент Института военного образования.
Область научных интересов – метрологическое обеспечение вооружения и военной техники.
fjke@gmail.com

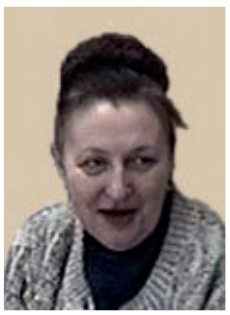
Лавровская Наталья Павловна

Кандидат физико-математических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры физики.
Область научных интересов – молекулярные потенциалы взаимодействия, физика тонких пленок.
adele1993@mail.ru

Лестев Александр Михайлович

Доктор технических наук, профессор.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, профессор кафедры высшей математики и механики.
Область научных интересов – динамика гироскопических и инерциальных навигационных систем.
aaa@bbb.ccc

Литвинова Надежда Николаевна



Кандидат физико-математических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры физики.
Область научных интересов – оптика, общая физика.
Litvinova_nn@inbox.ru

Лодыга Эдуард Валерьевич

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, студент кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – сложные системы.
eduard_lodyga@mail.ru

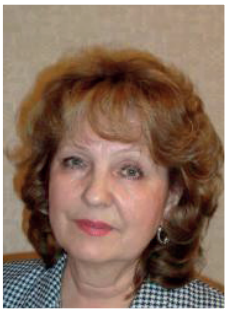
Макарова Мария Валентиновна

Кандидат технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры высшей математики.
Область научных интересов – нахождение предельных циклов обыкновенных дифференциальных уравнений, активные методы обучения.
Makarovammatem@rambler.ru

Матвеева Анастасия Викторовна

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, аспирант кафедры математики.
Область научных интересов – статистические методы оценки качества услуг в социальной сфере.
av.matveeva@bk.ru

Милова Валентина Михайловна



Кандидат технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – сложные системы, принятие управленческих решений, нечеткие множества.
milovavalentina@gmail.com

Мишура Тамара Прохоровна

Кандидат технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности.
Область научных интересов – исследование потенциальной разрешающей способности систем извлечения информации, цифровая обработка сигналов, синтез и анализ линейных фильтров сжатия сложных сигналов, измерение свойств наночастиц и наноматериалов.
metro-guap@yandex.ru.

Назаревич Станислав Анатольевич

Кандидат технических наук.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – оценка степени новизны инновационной продукции, квалиметрическая оценка, управление процессами.
albus87@inbox.ru

Новикова Анна Юрьевна

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, студент кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – оценка качества продукции.
anna_novikova96@mail.ru

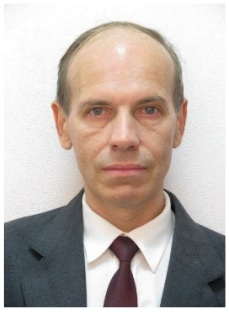
Новикова Юлиана Александровна

Кандидат физико-математических наук.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. доцент кафедры физики.
Область научных интересов – теория и технологии оптических интерференционных покрытий.
Nov-Jliana@yandex.ru

Опалихина Ольга Викторовна

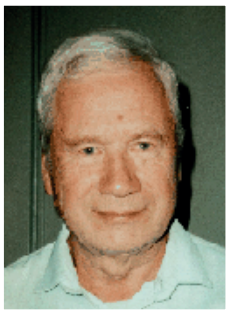
Кандидат технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры высшей математики и механики.
Область научных интересов – микромеханические датчики давления, цифровая обработка механических колебаний.
soko-sapsa@yandex.ru

Павлов Владислав Станиславович



Доктор технических наук, профессор.
АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», ведущий научный сотрудник.
Область научных интересов – радиолокация.
w14z@yandex.ru

Петров Юрий Петрович

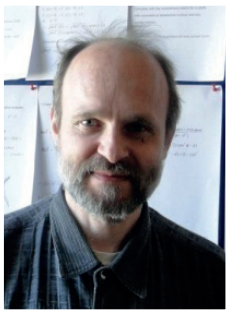


Доктор технических наук, профессор.
Санкт-Петербургский государственный университет, профессор кафедры моделирования электромеханических и компьютерных систем.
Область научных интересов – автоматическое управление, прикладная математика.
petrov1930@mail.ru

Пичугин Юрий Александрович

Доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, профессор кафедры высшей математики и механики.
Область научных интересов – построение и использование статистических и динамических моделей для анализа и прогноза многомерных нестационарных временных рядов, проверка сложных статистических гипотез.
yury-pichugin@mail.ru

Плаченов Александр Борисович



Кандидат физико-математических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры высшей математики и механики.
Область научных интересов – теория дифракции и распространения волн.
a_plachenov@mail.ru

Помыткин Сергей Павлович

Доктор физико-математических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, профессор кафедры высшей математики и механики.
Область научных интересов – неупругость, разрушение, нелинейные модели, эндохронный подход.
sppom@yandex.ru

Попова Анна Борисовна

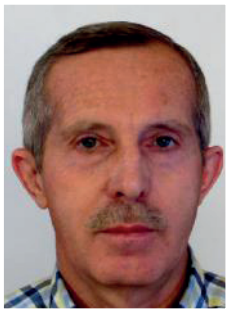
АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», инженер-технолог.
Область научных интересов – планарная технология, СВЧ, фотолитография.
popova_ab@radar-mms.com

Сведения об авторах

Разумовский Василий Борисович

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, студент кафедры высшей математики.
Область научных интересов – математическое моделирование в экологии.
razvasbor@gmail.com

Решетов Леонид Аркадьевич



Кандидат технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры прикладной математики.
Область научных интересов – проблемы разработки и совершенствования вычислительных методов линейной алгебры.
lr22222@mail.ru

Рожков Николай Николаевич

Доктор технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, профессор кафедры математики.
Область научных интересов – статистические методы контроля и управления качеством, статистические методы анализа данных нечисловой природы, разработка и внедрение балльно-рейтинговых систем оценивания.
nnr29@bk.ru

Романов Александр Егорович

АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», ведущий инженер.
Область научных интересов – приборостроение.
romanov_ae@radar-mms.com

Семенкова Галина Николаевна

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, студент кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – управление качеством, управление рисками.
glunka@yandex.ru

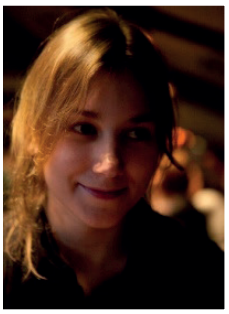
Семенов Георгий Антонович

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, студент кафедры высшей математики и механики.
Область научных интересов – прикладная математика.
george110994@gmail.com

Семенова Елена Георгиевна

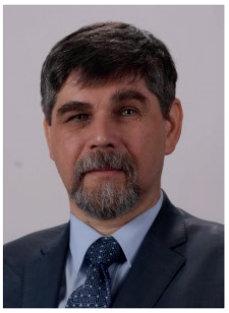
Доктор технических наук, профессор.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, заведующий кафедрой инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – инноватика, автоматизация производства, статистические инструменты управления качеством, системы управления производством, управление образовательными процессами.
egsemenova@mail.ru

Семенцова Александра Михайловна



Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, студент кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов.
Область научных интересов – исследование оптических констант, синтез интерференционных покрытий.
aleksandrakom@ya.ru

Смирнов Александр Олегович



Доктор физико-математических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, заведующий кафедрой высшей математики и механики.
Область научных интересов – нелинейная динамика.
alsmir@guap.ru

Смирнова Александра Сергеевна

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, старший преподаватель кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – аэрокосмическое дистанционное зондирование, РСА трасологическое дешифрирование.
alexssmirnova@gmail.com

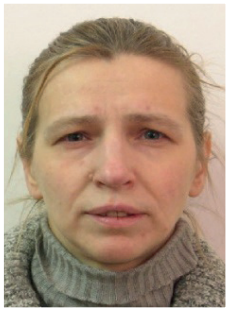
Смирнова Влада Олеговна

Кандидат технических наук.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – методы контроля и очистки водных сред, биотестирование, электрообработка систем с жидкой дисперсионной средой.
Vlada_sm@mail.ru

Смирнова Мария Сергеевна

Кандидат технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – управление качеством технических систем, менеджмент образовательных процессов.
maris_spb@inbox.ru

Соколовская Мария Владиславовна



Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, старший преподаватель кафедры прикладной математики.
Область научных интересов – информационные технологии в сфере образования.
mary@guap.ru

Старобогатов Ростислав Олегович

Кандидат физико-математических наук.
Ленинградский государственный университет им. А.С. Пушкина, доцент кафедры высшей математики.
Область научных интересов – математическое моделирование, запутанность в квантовой механике.
r.starobogatov@gmail.com

Старцева Наталия Владимировна

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, студент кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – оценка качества продукции.
nata13star@yandex.ru

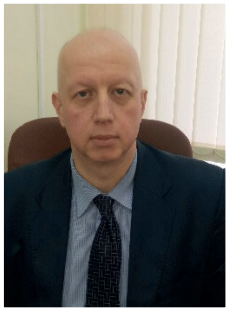
Сулаберидзе Владимир Шалвович

Доктор технических наук, старший научный сотрудник.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, профессор кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности.
Область научных интересов – прикладная метрология, метрологическое обеспечение и экспериментальные исследования теплофизических, механических, электрических свойств композиционных материалов.
sula_vlad@mail.ru

Тропин Алексей Николаевич

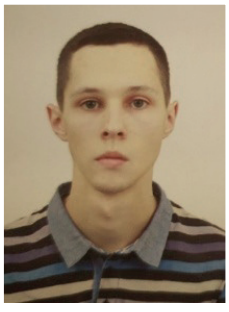
Кандидат физико-математических наук.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры физики.
Область научных интересов – теория и технологии оптических интерференционных покрытий.
tropal@mail.ru

Тушавин Владимир Александрович



Кандидат технических наук, кандидат экономических наук.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – управление программами и проектами, финансовый менеджмент, управление качеством, квалиметрия, стратегический менеджмент, организационная психология.
tushavin@gmail.com

Уренцев Александр Викторович

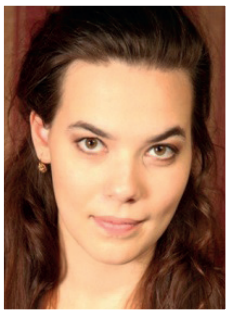


АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», инженер по качеству 2-й категории.
Область научных интересов – оценка качества и надежности сложных технических систем, системный анализ.
urencev_av@radar-mms.com

Федоренко Андрей Григорьевич

Кандидат технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры прикладной математики.
Область научных интересов – 3D-моделирование объектов сложной конфигурации.
12051312@mail.ru

Феоктистова Ольга Александровна



ООО НПК «ТИМ», начальник департамента персонала и административной работы.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, студент кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – сложные системы, принятие управленческих решений.
feniks_olga@mail.ru

Фролова Елена Александровна

Кандидат технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – управление качеством, сложные технические системы.
frolovaelena@mail.ru

Царев Юрий Николаевич

Кандидат физико-математических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
Область научных интересов – оптика, общая физика.
yur.carev@yandex.ru

Цыганков Максим Владимирович

АО «ГИРООПТИКА», инженер.
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», аспирант кафедры лазерных измерительных и навигационных систем.
Область научных интересов – разработка микроэлектромеханических преобразователей.
max.tsigankov@mail.ru

Цымбал Наталья Евгеньевна

Кандидат экономических наук.
ФБУ «Тест-С.-Петербург», ведущий инженер.
Область научных интересов – устойчивое развитие предприятий, принятие управленческих решений.
n.tsymbal@rustest.spb.ru

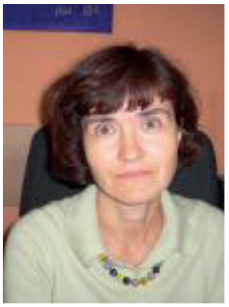
Чабаненко Александр Валерьевич

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, старший преподаватель кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – контроль и диагностика сложных систем и процессов.
chabalexandr@gmail.com

Чудиновских Игорь Владимирович

Центр региональных проблем экономики качества Института проблем региональной экономики РАН, главный специалист.
Область научных интересов – устойчивое развитие предприятий, принятие управленческих решений.
igor-chu65@mail.ru

Чуновкина Анна Гурьевна



Доктор технических наук, старший научный сотрудник.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, профессор кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности.
Область научных интересов – теоретическая и прикладная метрология, вопросы применения концепции неопределенности измерений в различных областях научных исследований и промышленности.
A.G.Chunovkina@vniim.ru

Шанта Марина Владимировна

ООО «БСХ Бытовые приборы», руководитель проектного отдела фабрики стиральных машин.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, аспирант кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – инноватика, автоматизация производства, статистические методы управления качеством, системы управления производством, управление проектами на производстве.
Marina.S_2004@mail.ru

Шишкин Илья Александрович

Кандидат технических наук.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – создание и развитие автоматизированных средств на геоинформационной основе, методов и алгоритмов управления территориально-производственными комплексами с обеспечением безопасности функционирования гидротехнических сооружений и водных объектов.
_ilya@mail.ru

Щеников Ярослав Алексеевич

Кандидат технических наук, доцент.
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
Область научных интересов – квалиметрия научных текстов, системы менеджмента качества.
yar2409@mail.ru

Юрковец Евгений Валерьевич

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, аспирант кафедры физики.
Область научных интересов – оптика и спектроскопия, оптическое приборостроение, физика тонких пленок
iurkovetc@gmail.com

Янченко Арина Юрьевна

Кандидат экономических наук, доцент.
ФБУ «Тест-С.-Петербург», главный специалист.
Область научных интересов – устойчивое развитие предприятий, принятие управленческих решений.
yanchenko@rustest.spb.ru

СОДЕРЖАНИЕ

КРУГЛЫЙ СТОЛ “ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ БОРТОВОГО РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ”

Артюхова М. А. ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ РЕЗЕРВИРОВАННОГО РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ 4

Блудов А. А., Павлов В. С., Балашов Е. В. МОДЕЛЬ ПЕЛЕНГАЦИИ ОБЪЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАВНОСИГНАЛЬНОГО МЕТОДА В УСЛОВИЯХ УГЛОВЫХ ЭВОЛЮЦИЙ НОСИТЕЛЯ РЛС 8

Артюхова М. А. СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ БОРТОВОГО РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ 12

Попова А. Б. МАРШРУТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ПЛАТ С НАИМЕНЬШИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ЗАТУХАНИЯ 15

Артюхова М. А. УЧЕТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ ИМПУЛЬСНОГО ХАРАКТЕРА НА ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ 17

Романов А. Е., Кондратьев В. М. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИНДУКЦИОННОГО ПОЖАРНОГО ИЗВЕЩАТЕЛЯ ДЛЯ СВЕРХРАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПОЖАРООПАСНОЙ СИТУАЦИИ 19

МАТЕМАТИКА

Балонишников А. М., Старобогатов А. О. ВЫВОД УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ДИССИПАЦИИ ИЗ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА ТУРБУЛЕНТНОЙ ВЯЗКОСТИ 23

Вершинина Л. П., Вершинин М. И. ИДЕНТИФИКАЦИЯ МНОГОМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ 28

Бутенина Д. В., Решетов Л. А., Соколовская М. В. РЕГРЕССИОННО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ МНОГОМЕРНЫХ ИНТЕГРАЛОВ ... 32

Бутенина Д. В., Решетов Л. А., Соколовская М. В. ОСОБЕННОСТИ ЗАКОНА РЕВЕРСИВНОГО ПСЕВДООБРАЩЕНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВЕДЕНИЯ МАТРИЦ ОДНОГО РАНГА 36

Козенко С. Л. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СОГЛАСОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ НА РАЗРАБОТКУ БОРТОВОЙ ЦИФРОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ 40

Федоренко А. Г., Голубков В. А. МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДЕЛЕЙ 3D-ОБЪЕКТОВ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ 47

Смирнов А. О., Ву Ван Диен. О ПЕРИОДИЧЕСКОМ РЕШЕНИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ВТОРОГО ПОРЯДКА С НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ В ВИДЕ ГИСТЕРЕЗИСА 51

Смирнов А. О. ЭЛЛИПТИЧЕСКИЕ СОЛИТОНЫ И УРАВНЕНИЯ ПИКАРА – ФУКСА 56

Смирнов А. О., Семенов Г. А. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ «ВОЛН-УБИЙЦ» 61

Копыльцов А. В. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СО СТРУКТУРИРОВАННОЙ СРЕДОЙ 67

Макарова М. В., Петров Ю. П. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗАВАРИЙНОЙ РАБОТЫ ОБЪЕКТОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ 70

Опалихина О. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОТКАЗОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ 77

Плаченов А. Б., Плаченов Б. Т. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭФФЕКТА ОКАНТОВКИ В НЕСЕРЕБРЯНЫХ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ 85

Забавникова Т. А., Помыткин С. П. ОПИСАНИЕ НЕКОТОРЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ В НЕЛИНЕЙНЫХ ЭНДОХРОННЫХ МОДЕЛЯХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ 90

Ассаул В. Н. О МАТРИЧНОЙ ИГРЕ РАЗМЕРНОСТИ 3×3 95

Лестев А. М., Цыганков М. В. О ВИБРОСТОЙКОСТИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ 100

ФИЗИКА

Котликов Е. Н., Лавровская Н. П., Царев Ю. Н., Семенцова А. М. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ МОНОКРИСТАЛЛОВ ZNSE В ДИАПАЗОНЕ 1–20 МКМ 104

Котликов Е. Н., Литвинова Н. Н., Новикова Ю. А., Юрковец Е. В. СИНТЕЗ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СВЕТОДЕЛИТЕЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ 108

Тропин А. Н., Андреев В. М., Коваленко И. И., Литвинова Н. Н. ВЛИЯНИЕ УГЛА ПАДЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ 112

Андреев В. М., Котликов Е. Н., Новикова Ю. А., Юрковец Е. В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ПЛЕНОК ZNS В ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА 1,5–25 МКМ 117

ИННОВАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

Семенова Е. Г., Семенкова Г. Н. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ РИСКОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОДУКЦИИ 122

Семенова Е. Г., Ивакин Я. А., Фролова Е. А. МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА ИНТЕРАКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РУКОВОДСТВ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕМОНТУ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ 129

Иванова Г. Н., Чудиновских И. В., Цымбал Н. Е. МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВЫМ РАЗВИТИЕМ ОРГАНИЗАЦИИ КАК МИКРОУРОВНЯ ОБЩЕЙ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ 137

Уренцев А. В., Назаревич С. А. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ КАК ОСНОВА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ 148

Назаревич С. А. ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ..... 153

Семенова Е. Г., Шанта М. В. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА БЫТОВОЙ ТЕХНИКИ 157

Тушавин В. А., Смирнова М. С. СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ РАНЖИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРИ РЕШЕНИИ КВАЛИМЕТРИЧЕСКИХ ЗАДАЧ.... 163

Андросенко Н. В., Янченко А. Ю. АСПЕКТЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ В КОНТЕКСТЕ ОСОБЕННОСТЕЙ УПРАВЛЕНИЯ.... 166

Милова В. М., Лодыга Э. В. ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ ЗАТРАТ НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЙ 174

Милова В. М., Феоктистова О. А. ПРОЦЕДУРА ОЦЕНКИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ ... 178

Старцева Н. В., Новикова А. Ю., Назаревич С. А. МОДЕЛИ СЦЕНАРИЕВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ДЕФЕКТОВ ИЗДЕЛИЙ, СОЗДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ 187

Чабаненко А. В., Смирнова В. О. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ С УЧЕТОМ ВХОДИМОСТИ МОДУЛЕЙ РЭА..... 192

Алёшкин А. Н., Гетманова Г. В. СПОСОБ ОПТИМИЗАЦИИ ЗАТРАТ НА РЕАЛИЗАЦИЮ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ 195

Щеников Я. А. НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА..... 200

Богдашева О. А., Щеников Я. А. ОСОБЕННОСТИ СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ ТЯЖЕЛОГО ТРАНСПОРТНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЧЕТВЕРТОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ РЕВОЛЮЦИИ..... 205

Щеников Я. А., Герасимова А. А. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕЖДУНАРОДНЫХ И ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СТАНДАРТОВ В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ И ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ НА ИХ ОСНОВЕ 214

Рожков Н. Н., Матвеева А. В. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОЦЕССОВ В ОБЛАСТИ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И КРИТЕРИЕВ ОПТИМИЗАЦИИ 219

Белова Е. С. SMART-ТЕХНОЛОГИИ В ВЫСШЕМ ОБРАЗОВАНИИ 223

МЕТРОЛОГИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ

Епифанцев К. В. ВВЕДЕНИЕ ТЕМАТИКИ 5S В КУРС ОБУЧЕНИЯ МЕТРОЛОГОВ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ 226

Мишура Т. П., Епифанцев К. В. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ СРЕДЫ И ЛИЧНОГО КАБИНЕТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ В ДВУХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЕ ОБУЧЕНИЯ..... 228

Епифанцев К. В., Кульбик В. В. ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТОВ САПР ДЛЯ АНАЛИЗА ЗОН КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ ШНЕКАХ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ..... 231

Сулаберидзе В. Ш., Чуновкина А. Г. О ПРИМЕНЕНИИ ТЕРМИНОВ «КАЛИБРОВКА» И «ПОВЕРКА» СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ В ОТЕЧЕСТВЕННЫХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТАХ..... 234

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Жильникова Н. А., Шишкин И. А., Баранова А. А. МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ЛИКВИДАЦИИ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ РАЗЛИВОВ НЕФТИ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ 238

Колобашкина Т. В., Кайдас Л. В. ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА АТМОСФЕРЫ В МЕЖДУНАРОДНОМ МАСШТАБЕ..... 244

Шишкин И. А., Жильникова Н. А. УНИФИЦИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ ПРИРОДНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ 249

Киприянова Е. Н., Смирнова В. О., Смирнова А. С. ОРГАНИЗАЦИЯ СЕТИ ПОСТОВ КОНТРОЛЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ГОРОДОВ 258

Пичугин Ю. А., Разумовский В. Б. ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ ДАННЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ МНОГОМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ..... 263

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ..... 267

Научное издание

МОДЕЛИРОВАНИЕ И СИТУАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Сборник докладов

9–13 апреля 2018 г.

Ответственные за выпуск:
доктор технических наук, профессор *Е. Г. Семенова,*
кандидат технических наук, доцент *М. С. Смирнова*

Редактор *О. Ю. Багиева*
Компьютерная верстка *А. Н. Колешко*

Подписано к печати 13.12.18. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 32,4. Уч.-изд. л. 32,7.
Тираж 150 экз. Заказ № 520.

Редакционно-издательский центр ГУАП
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская, ул., 67